

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

JOÃO HENRIQUE ANGELO

**Avaliação prévia da imunidade eletromagnética de pequenos equipamentos
utilizando célula TEM**

São Paulo
2024

JOÃO HENRIQUE ANGELO

**Avaliação prévia da imunidade eletromagnética de pequenos equipamentos
utilizando célula TEM**

Versão corrigida

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção do
título de Mestre em Ciências.

Área de concentração:
Sistemas Eletrônicos

Orientador:
Prof. Dr. Jorge Mieczyslaw Janiszewski

São Paulo

2024

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 22 de Março de 2024

Assinatura do autor



Assinatura do orientador



Catálogo-na-publicação

Angelo, João Henrique

Avaliação prévia da imunidade eletromagnética de pequenos equipamentos utilizando célula TEM / J. H. Angelo -- versão corr. -- São Paulo, 2024.

90 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos.

1.ELETROMAGNETISMO 2.COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA
3.ESTUDO DE CASO I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.
Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos II.t.

FOLHA DE AVALIAÇÃO

NOME: JOÃO HENRIQUE ANGELO

Titulo : Avaliação prévia da imunidade eletromagnética de pequenos equipamentos utilizando célula TEM

Dissertação apresentada à escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Aprovado em: 07 de fevereiro de 2024.

Banca examinadora

Prof. Dr. Jorge Mieczyslaw Janiszewski
Instituição : Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Julgamento: Aprovado

Prof. Dr. Mário Leite Pereira Filho
Instituição : Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de SP
Julgamento: Aprovado

Prof. Dr. Eduardo Victor dos Santos Pouzada
Instituição : Instituto Mauá de Tecnologia
Julgamento: Aprovado

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus amigos, professores e familiares.
Ao meu pai incentivador da minha atuação profissional (in memoriam), e a minha mãe que sempre esteve ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Esta dissertação foi realizada com a ajuda e acompanhamento de algumas pessoas.

Primeiramente agradeço ao professor Dr Jorge Mieczyslaw Janiszewski que sempre me incentivou, questionou e acompanhou cada detalhe deste trabalho, incluindo a revisão teórica e o acompanhamento prático das experiências realizadas. Sua contribuição foi essencial para a construção de uma dissertação com um conteúdo tecnológico amplo e atualizado.

Agradeço a todos os colegas do IPT, que me incentivaram e disponibilizaram a infraestrutura dos laboratório de EMC e de metrologia elétrica para realização dos experimentos contidos neste trabalho.

Agradeço ao laboratório do INPE-LIT pela disponibilidade da realização da radiografia do sensor de campo e calibração do sensor.

Resumo

O presente trabalho de Mestrado tem por objetivo analisar a utilização de célula TEM (transversal eletromagnética) para o estudo prévio de Imunidade Eletromagnética de pequenos equipamentos, a baixo custo. Descrevem-se a construção da célula TEM utilizada e sua caracterização (experimental e computacional) para uso em uma faixa de frequências de até 200 MHz. Medições em câmara semi-aneecóica e simulações computacionais são utilizadas para validar o emprego da célula. Para ilustrar a aplicação do procedimento, é analisada a eficácia de algumas configurações de blindagens visando otimizar recursos de projetos para atendimento às normas de compatibilidade eletromagnética.

Palavras-chaves: Compatibilidade Eletromagnética, Imunidade à interferência eletromagnética, célula TEM, blindagem eletromagnética.

Abstract

The purpose of this Master thesis is to analyze the use of TEM (transverse electromagnetic) Cell for the previous study of Electromagnetic Immunity of small equipment, at low cost. The construction of the TEM Cell and its characterization (experimental and computational) for use in a frequency range of up to 200 MHz are presented. Measurements in a semi-anechoic chamber and computer simulations are employed to validate the use of the Cell. In addition, as an application example, the effectiveness of different shielding configurations is analyzed in order to optimize design resources to meet electromagnetic compatibility standards.

Keywords: Electromagnetic compatibility, immunity to electromagnetic interference, TEM cell, electromagnetic shielding.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Principais topologias de interferência.....	17
Figura 2 - Ensaio de emissão radiada em câmara semi-aneecóica	19
Figura 3 - Ensaio de imunidade à radiação eletromagnética	21
Figura 4 - Arranjo recomendado para ensaio de imunidade irradiada.....	24
Figura 5 - Vistas longitudinal e transversal da célula TEM.....	33
Figura 6 - Eficácia de blindagem de parede de Cobre de $50,8 \times 10^{-3}$ cm.....	41
Figura 7- Eficácia de blindagem de parede de Aço SAE 1045 de $50,8 \times 10^{-3}$ cm	42
Figura 8 - Célula TEM fechada.....	44
Figura 9 – Dimensões da célula construída (a) vista lateral; (b) vista frontal.	45
Figura 10 - Célula TEM construída.....	46
Figura 11 - Esquema de excitação e medição. a) Posicionamento do sensor ao longo da célula; b) Vista superior da célula e posicionamento do sensor nos pontos 1,2 e 3 da seção.....	49
Figura 12 - Campo elétrico em três pontos ao longo da célula para tensão do gerador 10 V.....	50
Figura 13 - Variação do campo elétrico na seção transversal da célula, com tensão de gerador 10 V.....	51
Figura 14 - Arranjo experimental com VNA	51
Figura 15 - Medições com VNA (a) Impedância de entrada da célula; (b) taxa de onda estacionária (VSWR). Carga: 50Ω	52
Figura 16 - Vista das medições com TDR.....	53
Figura 17- Impedância ao longo da célula	54
Figura 18 - Detalhe do septo a) Septo da célula original; b) Septo da célula modificado.	54
Figura 19 - Variação da impedância ao longo da célula com novo septo.	55
Figura 20- VSWR da célula com septo modificado.	55
Figura 21- Medição do campo na célula com septo modificado. Posição dos pontos de medição ao longo da célula.....	56
Figura 22 - Campo elétrico ao longo da célula modificada.....	56
Figura 23- Medição do campo na seção transversal.....	57
Figura 24 - Simulação em COMSOL (a) Célula TEM; (b) Camada PML;.....	58

Figura 25 - Campo elétrico em 100 MHz com tensão de gerador em 10 V: (a) vista lateral; (b) vista superior e (c) seção central.....	59
Figura 26 - Pontos de avaliação de campo elétrico. (a) ao longo da célula;(b) na seção central.	60
Figura 27 - Resultados de simulação: intensidade de campo ao longo da célula.	60
Figura 28 - Campos elétrico e magnético ao longo da célula, em 100 MHz	61
Figura 29 - Valores experimentais e de simulação de VSWR:.....	61
Figura 30 - Exemplos de disposição dos elementos dos sensores.	62
Figura 31 - Sensores de campo utilizados: a) ETS - Lindgren HI 6153; b) Narda EMR.	63
Figura 32 -Disposição dos elementos nos sensores de campo.	63
Figura 33 - Radiografia do conjunto de antenas do sensor ETS-Lindgren HI 6153. .	64
Figura 34 - Calibração do sensor: a) Inclinação da haste para alinhamento de um elemento; b) Célula TEM para calibração.	65
Figura 35 - Posição recomendada para o sensor de campo.	65
Figura 36 - Configuração do ensaio na câmara anecóica.	66
Figura 37 - Medição na célula TEM.....	67
Figura 38 - Intensidade de campo medida em duas frequências a)100 MHz; b) 200 MHz.....	67
Figura 39 - Caixa 1 e respectivas aberturas.....	68
Figura 40 - Caixa 2 e respectivas aberturas.....	69
Figura 41 - Acomodação do sensor com a configuração da caixa 1.	69
Figura 42 - Campo elétrico no interior da blindagem, frequência 100MHz. a) medição do campo; b) leitura do valor de campo.....	70
Figura 43 - Simulação da caixa de blindagem 1 na célula a) desenho da caixa; b) vista superior do campo elétrico em mapa de cores	70
Figura 44 - Setup de medição dentro da câmara anecóica com blindagem.....	71
Figura 45 - Simulação das condições de medição na câmara anecóica.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Níveis de ensaios da norma IEC 61000-4-3.....	22
Tabela 2 - Níveis de ensaios da norma ISO 11452-3 (anexo E).....	37
Tabela 3 - Dimensões da célula TEM construída.....	46
Tabela 4 - Resultados de simulação e medição com as duas caixas em 100 MHz. .	72
Tabela 5 – Influência da altura da caixa 1 (abertura maior) sobre o campo elétrico em seu interior : simulação computacional.	73
Tabela 6 - Influência da altura da caixa 2 (abertura menor) sobre o campo elétrico em seu interior: simulação computacional.	73

Sumário

1. Introdução	13
2 Revisão Bibliográfica.....	15
2.1 Compatibilidade eletromagnética	15
2.2 Testes de compatibilidade eletromagnética	17
2.2.1 Ensaio de emissão radiada	18
2.2.2 Ensaio de imunidade irradiada	21
2.2.3 Ensaio de emissão conduzida.....	28
2.2.4 Ensaio de imunidade conduzida.....	29
2.3 Câmaras Anecóicas e Semi-anecóicas.....	31
2.4 Células TEM.....	32
2.5 Métodos Computacionais	37
2.6 Blindagem	39
3. Célula TEM construída.....	44
3.1 Estrutura da célula	44
3.2 Caracterização experimental e simulação computacional.....	48
3.2.1 Medições	48
3.2.2 Simulação computacional.....	57
4. Aplicação em testes de imunidade irradiada	62
4.1 Sensores de campo elétrico	62
4.2 Validação da correspondência de geração de campo elétrico na câmara anecóica e na célula TEM	65
4.3 Aplicação ao estudo de blindagem de equipamentos	68
5 Conclusões.....	75
5.1 Trabalhos futuros	77
Referências	78
Anexo 1 – Certificado de calibração do sensor de campo ETS.....	84

1. Introdução

O presente trabalho apresenta as bases e os resultados de uma pesquisa relacionada à compatibilidade eletromagnética de equipamentos eletrônicos de reduzida dimensão, considerando o uso de uma célula TEM para uma análise prévia, de baixo custo, da imunidade irradiada.

Com o crescente uso de equipamentos eletrônicos cada vez mais complexos, aumenta a preocupação em relação à interferência eletromagnética, que deve ser mitigada de forma a não prejudicar o desempenho dos equipamentos. Assim, já no desenvolvimento inicial de um projeto, na elaboração de protótipo e na produção do equipamento, devem ser adotadas medidas para reduzir os efeitos da interferência a um nível tolerável.

Vale ressaltar que em vários setores de consumo são obrigatórios testes (ensaios) de compatibilidade eletromagnética, como por exemplo, nas áreas automotiva, médica e telecomunicações.

A Interferência Eletromagnética EMI (Electromagnetic Interference) pode ser classificada de diversas formas, mas essencialmente corresponde a distúrbios de natureza eletromagnética com capacidade de afetar o comportamento normal dos equipamentos, enquanto que o termo Compatibilidade Eletromagnética EMC (Electromagnetic Compatibility) está ligado à capacidade de um equipamento suportar esses fenômenos sem sua degradação física e funcional e também de não produzir emissões que possam perturbar outros equipamentos[1, 2].

No âmbito de testes padronizados existem diversas normas que orientam ensaios a serem aplicados a cada produto, tais como: testes de emissão eletromagnética radiada e conduzida, imunidade irradiada e conduzida, descarga eletrostática ESD (Electrostatic Discharge), surto, entre outros. Dentre a gama de ensaios possíveis, neste trabalho será dada atenção ao ensaio de imunidade eletromagnética irradiada, no qual o equipamento é exposto a um campo elétrico externo, numa determinada faixa de amplitudes e frequências, compatíveis com a norma aplicável ao produto.

Os testes são realizados geralmente numa câmara anecóica, pois o uso desta permite que o ambiente de ensaio seja um ambiente controlado, ou seja, livre de campos externos indesejáveis. Uma antena inserida no interior da câmara cria um

campo com características adequadas (campo uniforme, por exemplo) para o ensaio do equipamento [3].

Neste contexto é importante que os projetistas de equipamentos estejam cientes dos testes que deverão ser realizados e assim antecipar possíveis problemas [4]. Para uma avaliação prévia do comportamento do equipamento nos ensaios, uma opção de testes em ambiente de desenvolvimento com baixo custo é a utilização de células TEM [5], nas quais podem ser gerados campos elétricos semelhantes aos que serão produzidos em testes finais (de maior custo) em laboratórios de compatibilidade eletromagnética. Claro está que considerando as dimensões usuais de células TEM, sua aplicação será limitada a equipamentos de pequeno porte.

Por outro lado, simulações computacionais constituem uma ferramenta de ampla aplicação, representando, também, uma possibilidade de avaliação prévia da imunidade, com custo menor. Em particular, a simulação pelo Método dos Elementos Finitos FEM (Finite Element Method) é altamente eficiente, existindo vários softwares comerciais nele baseados, tais como o COMSOL [6].

Nesse cenário, o objetivo deste trabalho é verificar a aplicabilidade da célula TEM em ensaios de imunidade eletromagnética de pequenos equipamentos, considerando, como exemplo, diferentes configurações de blindagem. Para isso, inicialmente uma célula TEM foi construída e caracterizada quanto ao seu comportamento (intensidade e distribuição de campo elétrico, faixa de frequências de utilização e volume útil). Em seguida, para validação da célula como meio de análise da Compatibilidade Eletromagnética, foram realizadas medições de campo elétrico presente na célula em várias situações, verificando-se o comportamento da célula por meio de medições numa câmara anecóica e simulações computacionais com o software COMSOL. A seguir, para um determinado equipamento, foram avaliadas, na célula, diferentes configurações de blindagens e os resultados foram validados por simulações computacionais (COMSOL) e por medições em câmara anecóica.

Para atender o que foi proposto, o texto que segue apresenta no Capítulo 2 uma revisão bibliográfica sobre os principais tópicos de interesse, enquanto que no Capítulo 3 são detalhadas a construção e a caracterização da célula utilizada no trabalho. Um exemplo de aplicação da célula é apresentado no Capítulo 4, com a comparação de resultados experimentais e de simulação, com a correspondente análise. Finalizam o texto as Conclusões, a proposta de trabalhos futuros e as Referências.

2 Revisão Bibliográfica

Apresenta-se, a seguir, uma revisão do material publicado referente aos temas que constituem o trabalho. A pesquisa bibliográfica procurou abranger tanto publicações mais recentes e específicas quanto aquelas com caráter mais clássico e geral. Os comentários estão agrupados em conformidade com os itens de maior importância para o presente trabalho.

2.1 Compatibilidade eletromagnética

O crescente desenvolvimento de equipamentos elétricos (e, em particular, eletrônicos) e sua cada vez maior complexidade, originou a necessidade de cuidados com relação à operação confiável dos mesmos, quando expostos à influência de uns sobre outros. Isto porque eles são emissores de campos eletromagnéticos que podem afetar equipamentos vizinhos, mas, também, eles podem estar situados num ambiente em que existe radiação eletromagnética que os pode afetar. Tem-se, então, os conceitos de emissão de radiação eletromagnética e de imunidade à interferência. A compatibilidade eletromagnética supõe que os equipamentos considerados podem operar sem problemas numa dada situação ambiental [1,2]. Dessa maneira, testes são realizados de acordo com Normas e, se o equipamento satisfaz os critérios nelas estabelecidos, diz-se que ele está em conformidade com as normas.

Em [7] essas ideias são expostas e é enfatizado que problemas futuros podem ser evitados desde que se dê atenção ao assunto já no projeto dos equipamentos. Fazendo um pequeno resumo histórico, o autor comenta que até os anos 1930 não havia a preocupação com a Compatibilidade, pois os equipamentos (rádioreceptores, basicamente) tinham que lidar apenas com fontes naturais de interferência (descargas atmosféricas, erupções solares). Com o desenvolvimento de equipamentos mais complexos, fontes de interferência de origem humana apareceram, de forma que em 1934 foi fundado o CISPR (International Special Committee on Radio Interference ou Comité International Spécial des Perturbations Radio), com a intenção de uniformizar os testes de compatibilidade. Os países mais desenvolvidos criaram, então, suas normas: por exemplo, nos Estados Unidos, a FCC (Federal Communications Commission) regula todas as fontes de radiação eletromagnética, no âmbito civil. Ainda segundo o Autor, a compatibilidade eletromagnética tornou-se mais importante

na segunda Guerra Mundial, em que embarcações da marinha utilizavam equipamentos eletrônicos de alta potência e complexidade.

Outras normas também podem ser utilizadas, como, por exemplo, as normas IEC (International Electrotechnical Commission), em que a compatibilidade eletromagnética é abordada na família IEC 61000, e as Normas ISO (International Organization for Standardization).

A extensão e a complexidade do assunto pode ser avaliada observando-se, por exemplo, a área específica de atividades considerada em [8], em que os autores tratam do problema de compatibilidade eletromagnética em equipamentos médicos, ressaltando que em hospitais existem equipamentos que produzem campos muito intensos (unidades de eletro cirurgia e aplicadores de diatermia, por exemplo) e, simultaneamente, equipamentos muito sensíveis, tais como aparelhos de eletrocardiografia e eletroencefalografia, o que gera problemas de interferência. Comentam, ainda, a norma EN 60601-1-2 e discutem as formas de geração e propagação da interferência eletromagnética na área médica.

O texto [9] também mostra a importância do estudo da interferência eletromagnética, considerando, agora, aeronaves. É discutido o uso de sistemas de chaveamento de alta potência, que podem gerar perturbações nas comunicações e controle do avião.

Em [10] são descritos os testes de compatibilidade eletromagnética em veículos elétricos, realizados de acordo com a norma europeia ECE R10-5. O assunto merece atenção especial pelo fato de esses veículos apresentarem, no processo de carga de baterias, interferência conduzida.

Para encerrar este item de caráter mais geral, pode-se citar o trabalho [11], uma nota técnica em que se discute a compatibilidade de placas de circuitos, considerando a importância da seleção de componentes, do projeto do circuito e do lay out da montagem. O autor apresenta, ainda, conceitos gerais da compatibilidade e uma discussão dos testes de imunidade relativos às Normas IEC 61000-4-2, IEC 61000-4-3 e IEC 61000-4-4. Além de apresentar recomendações práticas sobre a escolha de componentes e sobre a construção das placas de circuito, mostra um gráfico de caráter qualitativo em que se observa um custo velozmente crescente para as medidas visando atender às exigências da compatibilidade conforme se avança nas fases de definição do produto, de projeto do circuito, de definição do *layout*, de protótipo, de teste de funcionalidade e conformidade, do lançamento do produto e da

produção em massa. Isto fortalece o conceito de realização de testes preliminares, de baixo custo, para orientação do desenvolvimento de um produto.

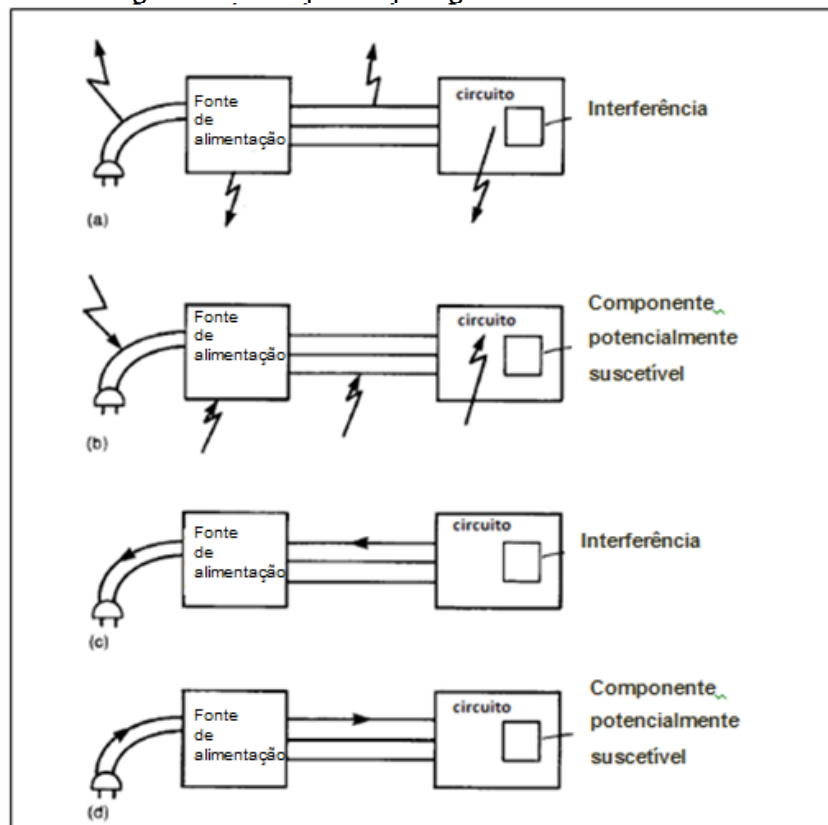
No item seguinte são descritos os testes usuais para a análise da compatibilidade.

2.2 Testes de compatibilidade eletromagnética

Para a análise do comportamento de sistemas com relação à compatibilidade eletromagnética, são realizados ensaios de laboratório orientados por normas que determinam o tipo de equipamento a ser utilizado, as condições dos testes e os resultados que, se obtidos, indicam a aprovação dos sistemas considerados.

A transferência de energia eletromagnética causadora de interferência pode ocorrer, de forma geral, nas condições apresentadas na figura 1, em que o sistema sob análise é representado por dois subsistemas (blocos), interconectados por cabos, e alimentado por uma rede de energia. Veem-se na figura os quatro problemas de compatibilidade eletromagnética, denominados como: emissão radiada, susceptibilidade irradiada, emissão conduzida e susceptibilidade conduzida [1].

Figura 1- Principais topologias de interferência.



Fonte: Figura obtida de [1].

Para avaliar o nível da interferência são realizados ensaios correspondentes às configurações descritas, denominados: ensaio de emissão radiada, ensaio de imunidade irradiada, ensaio de emissão conduzida e ensaio de imunidade conduzida. Os ensaios são regidos por normas que fixam critérios para a aprovação dos sistemas quanto à compatibilidade eletromagnética. Nos EUA, a agência reguladora FCC determina os níveis e critérios para aprovação em equipamentos de telecomunicações, enquanto que no Brasil a agência reguladora é a ANATEL e a CISPR é responsável por gerar documentos técnicos diversos que podem ser utilizados nos ensaios requeridos [1].

Os dispositivos a serem analisados são classificados como geradores de ondas eletromagnéticas de forma intencional ou não. Dessa forma, uma antena será classificada como do tipo gerador intencional, enquanto que dispositivos eletrônicos, em sua grande maioria, não devem emitir ondas eletromagnéticas em nível apreciável [2].

Conforme [1], vale ressaltar que ao lado desses problemas ligados ao projeto dos equipamentos (que deve atender à Conformidade em relação às Normas), são, também, motivo de preocupação os problemas causados por: descargas eletrostáticas ESD (Electrostatic discharges); pulsos eletromagnéticos originados em detonações nucleares NEMP (Nuclear Electromagnetic Pulses); descargas atmosféricas LEMP (Lightning Electromagnetic Pulses). Os dois últimos problemas podem ser associados à susceptibilidade a emissões radiadas na terminologia geral de Compatibilidade Eletromagnética.

Como exemplo, para possibilitar uma visão geral do assunto, o trabalho [12] relata atividades de realização de testes de emissão e imunidade em veículos, segundo as normas CISPR 25 e ISO11452, discutindo aspectos relativos aos próprios testes e apresentando algumas conclusões práticas de como mitigar os problemas de interferência detectados.

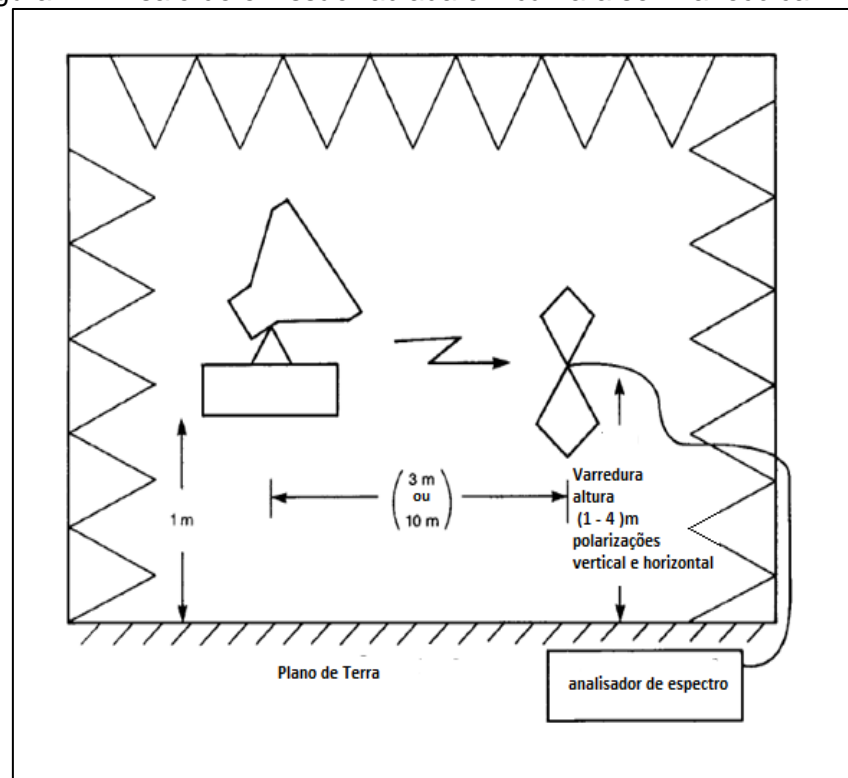
2.2.1 Ensaio de emissão radiada

O teste de emissão radiada deve ser conduzido preferencialmente em áreas abertas OATS (open area test sites) ou em uma câmara semi-anecóica SAC

(semianecoic chamber), que provê um ambiente que se aproxima das condições de espaço livre, pelo emprego de materiais absorvedores em suas paredes e teto, o que reduz as múltiplas reflexões. Além disso, a câmara fornece um ambiente livre de interferência externas, graças à sua blindagem. As medições são realizadas por meio de uma antena com polarização tanto vertical como horizontal [1].

Como sugerido na figura 1(a) e detalhado na figura 2, o equipamento sob teste (ESE), mantido em operação normal durante o ensaio, é posicionado a uma distância de 3 m ou 10 m da antena receptora, o que permite realizar as medições de intensidade do campo emitido pelo equipamento dentro de uma faixa de frequências estabelecida na norma pertinente. A antena é posicionada em 4 alturas e são analisadas as emissões em polarização vertical e horizontal. De acordo com o FCC, são utilizadas frequências variando de 30 MHz a 40GHz [1].

Figura 2 - Ensaio de emissão radiada em câmara semi-anecóica



Fonte: Figura obtida de [1].

Em [13] os autores relatam ensaios para análise da emissão radiada de um microcontrolador e propõem uma modelagem que permite avaliar previamente o espectro de frequências dessa emissão. Com base na Norma IEC 61967- 2, foram realizados testes numa célula TEM, com carga de 50 ohms numa terminação e um

analisador de espectro com amplificador na outra. A placa contendo o microcontrolador foi colocada numa das paredes da célula, de modo a irradiar a interferência para dentro da célula. Análise das medições realizadas em duas formas de operação permitiu concluir que a principal fonte de interferência era a memória “flash” do equipamento.

Foram também realizadas medições de interferência de campo próximo emitido pelo circuito, de acordo com a Norma IEC 61967-3, utilizando sensores de campo elétrico (monopolo para a componente E_z) e magnético (loop para H_x e H_y). A placa com o microcontrolador foi montada numa base plana e um sistema de posicionamento movia os sensores ao longo das coordenadas x e y para a medição dos campos próximos.

Uma contribuição adicional do trabalho é o desenvolvimento de um modelo de circuitos para a emissão de interferência, de acordo com o Modelo Elétrico de Circuitos Integrados ICEM (Integrated Circuits Electrical Model), descrito na Norma IEC 62014-3. A célula TEM foi também representada por um modelo, de forma a permitir a simulação das medições anteriormente realizadas. O modelo obtido apresentou comportamento compatível com as medições, de forma que resultou adequado para uma análise prévia das emissões por meio de simulação a ser realizada ainda na etapa de projeto. Finalmente, os autores introduziram algumas modificações no *lay out* do circuito, visando melhorar seu desempenho quanto à Compatibilidade Eletromagnética e confirmaram os resultados tanto pelo modelo quanto por medições.

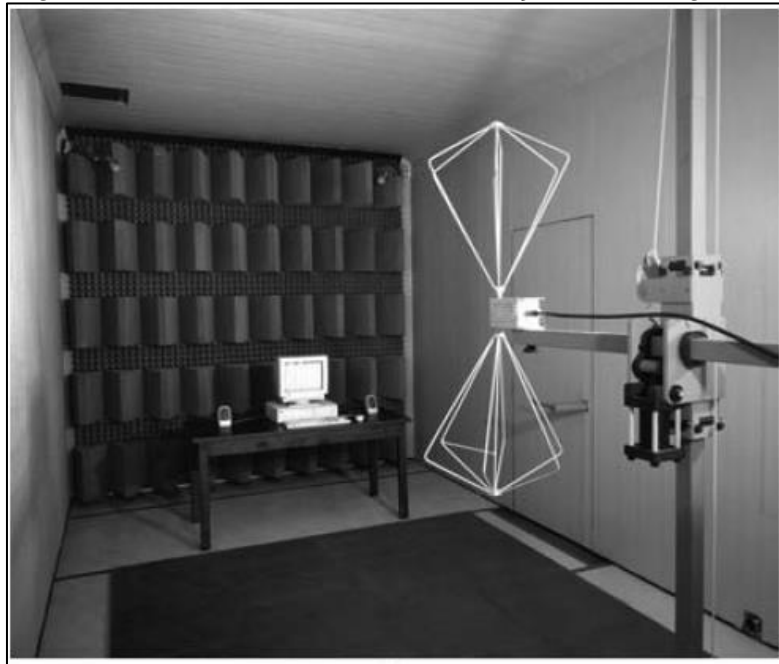
Em [14], os autores realizaram o estudo da influência dos componentes do sistema de medição (câmara semi-anecóica e antenas) nos resultados do teste de emissão radiada, de acordo com a Norma CISPR 25. As medições foram feitas em duas câmaras e o equipamento analisado foi um painel automotivo, que, além do alto-falante e um microcontrolador, contém os instrumentos com informações de velocidade, temperatura do motor, nível de combustível etc. Foram usadas várias antenas para os testes: antenas monopolo (0,1 a 30 MHz), bicônicas (30 a 200 MHz), logperiódicas (200 MHz a 1 GHz), logperiódicas (1 GHz a 3,2 GHz). Dois amplificadores de RF (rádio frequência) foram também utilizados. Uma comparação dos testes mostrou que os resultados dependem do sistema de medição, às vezes de forma significativa, embora o equipamento sob teste satisfaça as exigências de conformidade com as normas.

2.2.2 Ensaio de imunidade irradiada

Sendo o foco principal de interesse neste trabalho, a análise da Imunidade Irradiada será examinada de forma mais detalhada. O propósito do ensaio, apresentado de forma esquemática na figura 1(b) e detalhado na figura 3, é garantir que o equipamento vá operar adequadamente quando instalado nas vizinhanças de fontes de campo eletromagnético [1,2].

A realização do ensaio é ilustrada na figura 3, em que uma antena bicônica, operando na faixa típica de 30 – 200 MHz, induz interferência de campo elétrico na região em que está situado o equipamento testado. Valores típicos de campos são da ordem de 3 a 10 V/m para produtos comerciais e médicos e de até 200 V/m, tratando-se de ensaios automotivos.

Figura 3 - Ensaio de imunidade à radiação eletromagnética



Fonte: Figura obtida de [1].

A conformidade com este tipo de teste é verificada através do monitoramento do equipamento em condições normais de funcionamento. Assim, por exemplo, um equipamento médico do tipo monitor multiparamétrico quando submetido a tal ensaio não poderá apresentar degradação em seu desempenho essencial, o que consiste em alguns casos na perda de leituras, variações de medidas acima da tolerância aceitável, atuação imprópria de alarmes e informações afetadas por falhas de

displays. Este ensaio pretende garantir o correto funcionamento do equipamento médico no local de sua instalação e, por consequência, a segurança dos pacientes. Assim também no caso de equipamentos automotivos, que precisam ser seguros mesmo quando sujeitos a diversas fontes de interferência em seus trajetos.

A norma IEC 61000-4-3 [15] está atualmente entre as principais que orientam o ensaio de imunidade em equipamentos eletrônicos e seus pontos principais são a seguir resumidos.

A maioria dos equipamentos eletrônicos é, de alguma forma, afetada pela radiação eletromagnética, muitas vezes gerada por fontes de uso geral, como celulares, pequenos transmissores de rádio portáteis utilizados por pessoal de operação, manutenção e segurança, ou estações fixas de rádio e de televisão, transmissores de rádio veiculares e diversas fontes de campo eletromagnético existentes em instalações industriais.

Os níveis de intensidade de campo elétrico estipulados para os ensaios para fins gerais são vistos na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1- Níveis de ensaios da norma IEC 61000-4-3

Nível	Intensidade de campo V/m
1	1
2	3
3	10
4	30
X	Especial

Fonte: Tabela obtida de [15].

A intensidade de campo de ensaio refere-se ao sinal da portadora não modulada. Para o ensaio do equipamento, este sinal da portadora é modulado em amplitude em 80% com uma onda senoidal de 1 kHz para simular situações mais reais. As frequências normalmente utilizadas estão na faixa de 80 MHz a 6 GHz. Outros valores de frequência são estipulados para sistemas específicos (telefone digital, por exemplo).

Os equipamentos recomendados para o ensaio são:

- Câmara anecóica;
- Filtros de Interferência Eletromagnética (EMI);
- Gerador de sinais de rádio Frequência (com filtros para evitar problemas de harmônicos);
- Amplificadores de potência para atingir a intensidade de campo desejada;
- Antenas de geração de campo: bicônica, log-periódica, corneta ou outro sistema de polarização linear;
- Sensor de campo isotrópico.

Devido à magnitude da intensidade de campo empregada, os ensaios devem ser feitos em um recinto blindado, para evitar interferência em sistemas externos. O recinto blindado evita, também, a interferência do sinal de ensaio sobre os equipamentos de medição. Nessa condição, deve-se ter o devido cuidado para reduzir o fluxo de interferência pelos cabos de conexão [15]. Antes da realização do ensaio é feita uma verificação da uniformidade de campo na região do equipamento sob ensaio (ESE), sem a presença deste. A norma estabelece as condições para essa calibração, de modo a definir a área de Campo Uniforme UFA (Uniform Field Area), que não pode ser menor do que 0,5 m x 0,5 m.

Na execução do ensaio, o ESE (em condições normais de funcionamento) é inicialmente colocado com uma face coincidente com esse plano de calibração. A face do ESE iluminada deve estar contida dentro da área de campo uniforme (UFA). As faixas de frequência a ser consideradas são varridas com sinal modulado. Quando a faixa de frequências é varrida de forma incremental, o tamanho do passo não pode exceder 1 % do valor da frequência anterior.

O tempo de permanência da portadora modulada em amplitude em cada frequência deve ser suficiente para o ESE responder, mas em nenhum caso pode ser inferior a 0,5 s.

O ensaio deve ser normalmente executado com a antena geradora de frente para cada face do ESE e cada face deve ser testada duas vezes, uma com polarização horizontal e novamente com polarização vertical. Além disso, tentativas devem ser feitas para realizar o ensaio em todos os modos de funcionamento críticos selecionados [15].

Na avaliação dos ensaios, os resultados devem ser classificados em termos de perda de função ou degradação de desempenho do equipamento em relação a um

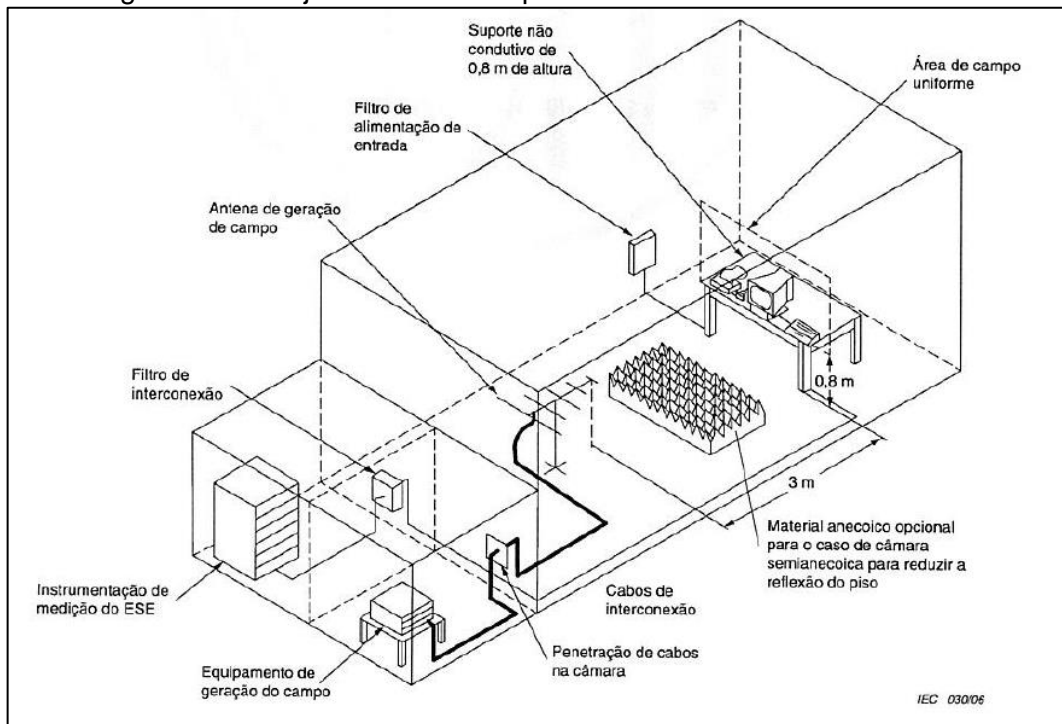
nível de desempenho definido pelo seu fabricante ou solicitante do ensaio, ou acordado entre o fabricante e o comprador do produto.

Os níveis para essa classificação são:

- a) desempenho normal dentro dos limites especificados pelo fabricante, solicitante ou comprador;
- b) perda temporária de função ou degradação de desempenho que cessa após o término da perturbação, e a partir da qual o equipamento sob ensaio recupera o seu desempenho normal, sem intervenção do operador;
- c) perda temporária de função ou degradação de desempenho, cuja correção exige a intervenção do operador;
- d) perda de função ou degradação de desempenho que não é recuperável, devido a danos no hardware ou no software, ou perda de dados.

Na figura 4 é apresentado o arranjo físico recomendado para aplicação da norma.

Figura 4 - Arranjo recomendado para ensaio de imunidade irradiada



Fonte: Figura obtida de [15].

A referência [16] destaca uma preocupação com a validação da capacidade de realização de testes de imunidade num determinado laboratório, mediante a comparação de resultados obtidos em diferentes laboratórios (comparação interlaboratorial). O autor propõe um dispositivo de teste padrão especialmente desenvolvido para essa análise, de acordo com a Norma IEC 61000-4-3 [15] e constituído por um alojamento com cabos de sinal e de alimentação, contendo uma antena e um detector de faixa larga que mede sinais dos cabos e da antena. A informação do detector é encaminhada por uma fibra óptica a um dispositivo de leitura. Os testes foram realizados em 8 laboratórios e os resultados mostraram que os laboratórios podem apresentar diferenças de ± 6 dB apesar de poder ser obtida dispersão de mais de 10 dB no teste de calibração da área de campo uniforme.

No trabalho [17] é discutida a dificuldade de execução do teste de imunidade de acordo com a norma IEC 61000-4-3 em câmara anecóica com campo calibrado, quando se trata de ESE de grande dimensão, de alta potência ou com dispositivos auxiliares a ele agregados. Nesses casos, na indústria são realizados testes alternativos. Os autores investigam experimentalmente três métodos de testes: o padrão, com campo uniforme, o método de ajuste de campo (em que o campo sobre o ESE é monitorado por um sensor e ajustado) e o método de campo calculado teoricamente na posição do ESE (a partir do ganho da antena e da distância antena-ESE). Foram utilizados como ESE dois dispositivos: uma caixa metálica de dimensões 0,5 m x 0,5 m x 0,5 m com fendas na face anterior, uma antena interna e cabos externos e uma outra caixa com mesmas características, mas de dimensões 1 m x 1 m x 1 m (para verificar a influência de dimensões maiores). Os cabos externos e a antena interna estavam conectados ao mesmo ponto interno e o sinal aí obtido era levado a um analisador de espectro.

Os testes mostraram diferentes resultados apesar de em todos eles procurar-se obter o mesmo campo na posição do ESE. O autor conclui que o método do campo calculado é mais adequado do que o de ajuste de campo, pois neste pode ocorrer “sobre” ou “sub” teste por influência do próprio ESE ou de reflexões por ele causadas.

Outro ambiente de testes de imunidade além das câmaras anecóicas ou semianecóicas é constituído pelas células TEM - com duas portas - e GTEM (*GigaHertz Transverse Electromagnetic*) – com uma porta e parede absorvedora na face posterior - que serão descritas, adiante, de forma mais detalhada. As células

constituem uma alternativa atraente, por serem de pequenas dimensões e de custo reduzido, quando comparadas às câmaras. Elas têm, entretanto, como limitação principal o tamanho do equipamento que poderá ser ensaiado.

A Norma IEC 61000-4-20 [18], entre outras, orienta a execução de testes de emissão e imunidade irradiadas utilizando essas células, não só em equipamentos, mas também em componentes e circuitos integrados, além de permitir a análise de eficácia de blindagem de cabos e juntas (*gaskets*). Para a realização dos testes é importante o conceito de “área de uniformidade” de campo, que depende das dimensões da célula e que determina o tamanho máximo do equipamento a ser testado. A validação dessa uniformidade é definida na Norma, que também recomenda o equipamento necessário para os testes:

- Célula TEM de dimensões adequadas;
- Filtros de interferência;
- Geradores de RF;
- Amplificadores de potência;
- Sensores de campo para as três componentes de campo;
- Equipamento para gravar os resultados.

Os testes são realizados com cada uma das faces do ESE de frente para a porta de célula em que está conectado o gerador. Como na célula o campo está polarizado numa única direção, para considerar outra polarização, o teste é repetido, girando-se o ESE.

Um exemplo de aplicação convencional de célula GTEM pode ser vista em [19], num teste de imunidade irradiada em telefone celular. São comentadas, no trabalho, as Normas aplicáveis e é descrita a célula utilizada, com sua caracterização. De acordo com as normas analisadas (IEC 61000-4-3, IEC 61000-4-20, EN 55022) é recomendada a existência de uma região de campo uniforme com desvio de ± 3 dB no volume de teste da GTEM. Para isto, o coeficiente de reflexão na secção final foi mantido menor do que -30 dB. A faixa de frequências analisada foi de 230 MHz a 1 GHz, com campo elétrico da ordem de 10 V/m. Em toda duração do teste o telefone não apresentou falha de funcionamento, de forma que foi considerado aprovado quanto à imunidade irradiada. O estudo mostrou, também, a boa repetitividade e acurácia das medidas na célula, com a vantagem de baixo custo de instalação e manutenção em comparação com testes em área aberta ou em câmaras.

Em [20] foram realizados testes de imunidade irradiada em célula GTEM em três equipamentos médicos - Eletrocardiógrafo (ECG), monitor e bomba de infusão - quanto à imunidade à radiação de equipamentos de telecomunicações, especificamente Wi-Fi, GSM (Global System for Mobile communication) e PMR (Personal Mobile Radio). Os autores verificaram, também, que os referidos equipamentos médicos apresentam emissões com picos em determinadas frequências, como, por exemplo, em torno de 27 MHz e 800 MHz para o ECG. Os testes de imunidade dos equipamentos médicos foram realizados numa célula GTEM de acordo com a norma ANSI 63.18 de 10 kHz a 2,5 GHz. Os resultados mostraram que com as fontes de interferência muito próximas dos equipamentos estes apresentaram erros de funcionamento e alterações de display, mostrando a necessidade de cuidado quanto às interferências presentes nos ambientes médicos.

A célula TEM (ou GTEM) pode ser utilizada no domínio da frequência ou no domínio do tempo [21] e no Anexo C da norma estão definidas as condições para testes com formas de onda transitórias, mas limitadas a pulsos descritos por exponencial dupla, com parâmetros tempo de subida e largura de pulso (tempo de meio valor). Assim, o campo elétrico medido no volume de teste da célula deve estar dentro de um intervalo de tolerância permitida para os tempos de subida e de meio valor em relação ao sinal aplicado.

Como nem todas as formas de onda podem ser assim descritas, o artigo [21] investiga o comportamento de células TEM convencional e GTEM no domínio da frequência e propõe um novo critério visando verificar a adequação da célula para testes com sinais transitórios de variadas formas de onda.

Outro trabalho ligado à realização de teste de imunidade irradiada em célula TEM com sinais transitórios pode ser visto em [22]. Os autores apresentam proposta para gerar, dentro de uma célula GTEM, um campo elétrico que reproduz o campo provocado por descargas atmosféricas. O campo elétrico é produzido aplicando-se à porta de entrada da célula um gerador Marx, constituído de 4 estágios capacitivos que são carregados em paralelo e descarregados em série, para gerar o pulso de alta tensão (300 kV). As medições, feitas com antena dipolo associada a um Osciloscópio de banda 1GHz e frequência de amostragem 5 GHz, mostraram que o simulador de campo elétrico desenvolvido permite obter na GTEM um ambiente com campos de descargas atmosféricas relativamente homogêneo, dentro de 3 dB de desvio. Foram também investigados os efeitos desses campos simulados sobre um circuito digital e

um circuito regulador de tensão com cabos. O artigo também apresenta uma proposta para simular o campo magnético de uma descarga atmosférica, mas no interior de uma bobina e não na célula.

Um problema interessante é analisado em [23]: para muitos equipamentos, tais como aparelhos auditivos, o resultado desejado em teste de imunidade é o medido na orientação do ESE (equipamento sob ensaio) mais sensível em relação ao campo aplicado. Isto é normalmente avaliado numa célula GTEM a partir de medições realizadas num certo número de orientações, obtidas girando o ESE de uma forma determinada. Muitos estudos comparando resultados de testes com antena dipolo e com célula GTEM mostraram como resultado geral uma aparente imunidade 5 a 15 dB maior no caso de teste com antena dipolo, presumindo-se que a diferença se deva a diferentes campos de excitação do ESE. Com base em medições realizadas em aparelhos comerciais, os autores propõem novas orientações que conduzem a uma “soma - máxima”. Aplicando a metodologia proposta a 10 aparelhos, verificou-se que os resultados obtidos diferem, em média, em apenas -0,5 dB do valor de referência.

2.2.3 Ensaio de emissão conduzida

Neste ensaio, conforme apresentado na figura 1(c), o equipamento analisado é conectado à alimentação através de uma Rede de Estabilização de Impedância LISN (*Line Impedance Stabilization Network*), e a intensidade de interferência transmitida pelos cabos de alimentação do equipamento é medida através de uma derivação da LISN, de forma a verificar se tal intensidade está dentro dos limites especificados pelas normas.

O controle da emissão conduzida é necessário pelo fato de que os equipamentos, quando conectados às redes de alimentação, nelas injetam perturbações que, se forem de nível elevado, afetam o funcionamento de outros equipamentos compartilhando a mesma instalação [1]. Conforme a FCC, as frequências típicas de ensaio vão de 150 kHz a 30 MHz [1].

A análise desse problema de compatibilidade deve ser estendida a todos os produtos eletrônicos das indústrias militares, civis em geral e automotivas. Verifica-se que as normas utilizadas por essas indústrias apresentam especificações muito variadas. Em [24] os autores estudam vários parâmetros de testes definidos nas

normas Mil-Std-461G (militar), CISPR 11(civil) e CISPR 25 (automotiva) e compará-las visando orientar a condução desses testes de forma eficaz. Os resultados são apresentados numa tabela comparativa considerando frequência, aplicabilidade, metodologia, LISN, aterramento, cabos e características dos sensores.

Em [25], é mostrado o teste de emissão conduzida de um *Laptop*, segundo a Norma CISPR 16-2-1, na faixa de frequências 150 kHz -30 MHz. Foram usados os equipamentos: Filtro LISN que conecta o ESE à rede (e que tem uma derivação para a medida do sinal de interferência), receptor para medição na faixa de 9 kHz a 3 GHz ligado a um computador com software dedicado EMC 32. O Filtro LISN é um circuito R-L-C passivo, que com a entrada do receptor (50 ohms) conectada na derivação, apresenta uma impedância de 50 ohms ao ESE. Os valores máximos de interferência permitidos para essa classe de ESE (classe B) são especificados na norma CISPR 22 e não foram atingidos no teste, concluindo-se que o equipamento analisado estava em conformidade com a norma.

2.2.4 Ensaio de imunidade conduzida

Os ensaios de imunidade conduzida são realizados por meio da aplicação de sinais de interferência na conexão dos cabos de alimentação, de forma a avaliar se o equipamento possui tal imunidade [1]. Durante o ensaio, o equipamento é monitorado para se verificar se ele preserva seu adequado desempenho, enquanto sujeito à interferência.

A norma EN 61000-4-6 orienta a realização do teste de imunidade conduzida a sinais de RF. Ela estabelece, de forma geral, como aceitáveis testes na faixa de frequências de 150 kHz a 230 MHz para equipamentos pequenos e na faixa de 150 kHz a 80 MHz para equipamentos maiores. Os testes podem ser realizados aplicando sinais aos cabos do ESE, segundo um dos seguintes métodos [26]: injeção direta de tensão usando circuitos de acoplamento/desacoplamento; injeção de tensão induzida (utilizando *EM Clamps*, dispositivos comerciais que envolvem os cabos do ESE e neles induzem sinais por acoplamento capacitivo e indutivo); e injeção de corrente induzida BCI (Bulk Current Injection), utilizando um *clamp*, que é basicamente um transformador de corrente que abraça o cabo do ESE, nele induzindo corrente. Um segundo *clamp* é usado para monitorar a corrente de RF no cabo, de forma a impor o

valor recomendado, independentemente da impedância do cabo. Existe uma grande variedade desses dispositivos e eles devem ser aplicados aos cabos no ponto mais próximo possível do equipamento, para evitar atenuação dos sinais de frequência mais alta nos cabos [26].

Em [27] os autores fazem uma comparação interlaboratorial quanto ao teste de imunidade conduzida segundo a Norma IEC 61000-4-6, utilizando como ESE um dispositivo por eles desenvolvido. A intenção é a avaliação da capacitação de laboratórios para realizar o teste. O dispositivo tem 5 interfaces, representando interfaces usuais típicas: alimentação, conector-banana, conector USB, Ethernet e interface de dados sem blindagem (conector OB de 16 pinos). Para a medição das correntes nas interfaces, o dispositivo tem pequenos *clamps* fixados nelas. Também é medido o potencial do invólucro metálico do sistema.

Os autores descrevem os resultados de uma comparação realizada em 2016 com 10 laboratórios europeus, utilizando a Norma ISO 13528 como ferramenta estatística para avaliação de proficiência. Verificou-se que mesmo em se tratando de laboratórios reconhecidos, o dispositivo conseguiu detectar falhas na execução do teste.

A geração de energia elétrica convencional está sendo substituída por fontes alternativas (solar, eólica), que incorporam circuitos de chaveamento produtores de harmônicos, que afetam os medidores de energia. Segundo [28], o problema é considerado no Anexo C da Norma IEC 61000-4-19 e o Relatório Técnico TR 50579 trata de níveis de severidade, requisitos de imunidade e métodos de teste na faixa de frequências de 2 kHz a 150 kHz. O autor do trabalho apresenta a realização de teste de imunidade, aplicando ao medidor de energia sob teste a tensão da rede, a corrente de 50 Hz da rede (carga) e, simultaneamente, uma corrente de frequência variável (2 kHz a 150 kHz), representando a interferência. Os circuitos dessas correntes são convenientemente desacoplados, garantindo sua independência.

A título de ilustração, vale ressaltar que para medidores de conexão direta (sem transformador), Classe C, com corrente de distúrbio de 2 A na faixa de 2 a 30 kHz, o erro máximo permitido é de 2%.

2.3 Câmaras Anecóicas e Semi-anecóicas

A câmara anecóica é um recinto blindado de variadas dimensões, com revestimento absorvedor nas paredes, no teto e no piso. Dessa forma, testes podem ser realizados em seu interior, livres de perturbações externas e reflexões. O material absorvedor é, em geral, espuma sintética impregnada de carbono e tem, normalmente, a forma de pirâmides (com a base fixada às paredes) de modo a fazer uma gradativa transição ar/material absorvedor e reduzir as reflexões [29]. Também são usados ladrilhos de ferrite. As câmaras semi-anecóicas não têm o revestimento absorvedor no piso.

Câmaras comerciais têm paredes de painéis metálicos de baixa corrosão e de espessura adequada para blindagem eficiente. Esses painéis são conectados intercalando juntas condutivas (malhas) entre eles. As portas e janelas (e passagens para cabos) são blindadas, com malhas condutivas para boa continuidade elétrica. Filtros também são utilizados nas conexões elétricas exterior/câmara e as aberturas de ventilação são projetadas para atenuar a radiação de interferência [30].

Para assegurar a qualidade dos testes realizados nas câmaras, é conveniente verificar se sua blindagem tem a necessária eficácia. O trabalho [31] relata os resultados de medições da eficácia de blindagem de uma câmara anecóica na faixa de 50 MHz a 15 GHz. Dentre os métodos que podem ser usados, ou seja, com sensores de faixa larga, com receptor seletivo e gerador sintonizável, com receptor seletivo e gerador *comb* (que produz várias harmônicas de seu sinal de entrada) e com gerador de pulso de alta energia, o autor utiliza o segundo, com as respectivas antenas transmissora e receptora. Inicialmente, é realizada uma medição de nível de campo com as antenas transmissora e receptora dentro da câmara. Em seguida, a medição é repetida com a antena transmissora fora da câmara. A eficácia da blindagem pode, então, ser determinada.

Em [32] são relatados os resultados de uma verificação da influência do tipo de material da mesa de suporte do ESE no ensaio de imunidade irradiada em câmara semi-anecóica. Isto foi feito substituindo o ESE por um sensor de campo elétrico e realizando as medidas de campo em 8 pontos na região da mesa. Foram testados os materiais madeira, isopor, espuma de estireno e plástico reforçado por fibra de vidro.

O experimento foi conduzido de acordo com a Norma IEC 61000-4-3, numa câmara semi-anecóica de 34 m x 34 m e 9 m, tendo sido inicialmente assegurada a uniformidade de campo na região da mesa, utilizando dois diferentes arranjos absorvedores no piso. Foram, então, medidos os campos nos oito pontos, nas frequências 80, 100, 150, 200, 300, 500, 700 e 1000 MHz. Os resultados mostraram que: a) o material da mesa afeta as medições acima de 500 MHz; b) é pequeno o desvio entre as medidas com espuma de estireno e plástico reforçado com fibra de vidro; c) medições na mesa de madeira diferem em 3 V/m ou mais em relação às outras, na polarização horizontal.

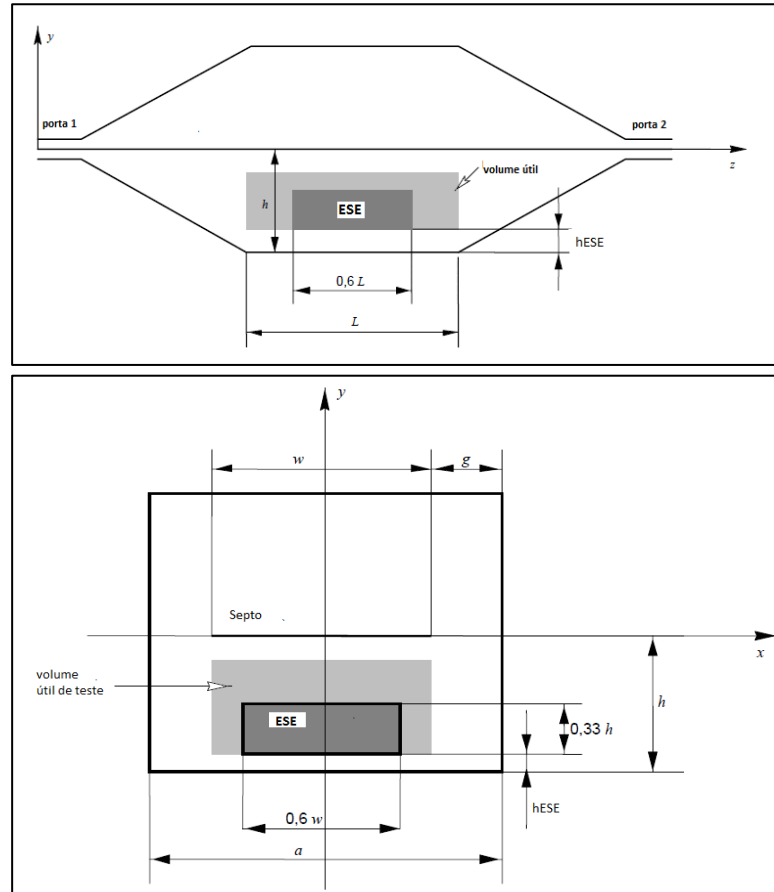
2.4 Células TEM

Existem basicamente dois tipos de células TEM (também denominadas guias de onda TEM): a “célula TEM” (transverse electromagnetic), de duas portas, e a “célula GTEM” (Giga Herz transverse electromagnetic), de forma piramidal, com a base absorvedora e uma porta apenas. O foco deste trabalho é a célula TEM de duas portas e septo simétrico, vista na figura 5 e descrita com mais detalhes no capítulo 3. Célula TEM construída.

A Norma IEC 61000-4-20 [18] detalha os testes de emissão e de imunidade que podem ser realizados com essas células. Vale ressaltar que, devido às dimensões reduzidas do espaço onde podem ser colocados equipamentos dentro de uma célula TEM, normalmente é realizado o teste em partes do equipamento, como, por exemplo, placas de circuitos ou somente circuitos Integrados, componentes eletrônicos, juntas (*gaskets*) ou cabos.

A figura 5 mostra um ESE, situado no “volume útil”, que depende da definição de uma área de uniformidade de campo, determinada como exposto adiante.

Figura 5 - Vistas longitudinal e transversal da célula TEM



Fonte: Figura obtida de [18].

Para ensaios de emissão eletromagnética, o ESE é inserido na célula, em funcionamento. Numa porta da célula é feito o casamento de impedâncias com uma carga de 50 ohms, enquanto que na outra é conectado um analisador de espectro que irá realizar a leitura da radiação de Rádio Frequência emitida pelo equipamento. A norma descreve em seu anexo A um algoritmo que permite converter os resultados obtidos a uma medição equivalente realizada em uma câmara semi-anecóica, de forma a prover um método válido e permitir sua repetibilidade.

Para os testes de imunidade eletromagnética, que são o foco deste trabalho, essa norma detalha alguns pontos importantes, tais como geração de campo, arranjo utilizado, limites de frequências e monitoração do campo elétrico no interior da célula.

A onda eletromagnética no interior da célula propaga-se na forma plana, com características de polarização vertical, com aproximadamente a mesma configuração de campos existente em câmaras anecóicas e com impedância de onda 377Ω (tal como no espaço livre). O valor aproximado do campo elétrico num ponto no meio da célula, entre o condutor externo e o septo, pode ser obtido pela expressão abaixo, dada na citada Norma [18],

$$E_{\text{approx}} = \frac{\sqrt{Z_0 P_{\text{aplicada}}}}{h} \quad (1)$$

em que :

E_{approx} : é o campo elétrico que será obtido no interior da célula (V/m);

Z_0 : é a impedância característica da célula (tipicamente 50Ω);

P_{aplicada} : é a potência do sinal aplicado na célula TEM;

h : é a altura entre base da célula e seu septo.

Deve-se observar que as células TEM (que podem ser consideradas guias de ondas com diferentes modos de propagação) podem apresentar ressonâncias, dependendo de suas dimensões, o que torna o campo elétrico em seu interior instável acima de determinadas frequências.

A Norma IEC 61000-4-20 especifica um procedimento que avalia a uniformidade de campo no interior da célula: com ela vazia e com um gerador de sinais não modulado numa porta, insere-se um sensor de campo elétrico isotrópico em seu interior e mede-se o campo elétrico resultante (expresso em dB (V/m)) em um plano retangular com ao menos 5 medições (4 pontos nos cantos e 1 ponto central). A variação máxima não deve ser superior a 6 dB. Com o cálculo da média e do desvio padrão das medidas, supondo distribuição normal, pode-se avaliar com dada probabilidade o intervalo de incerteza do campo na região analisada.

Verificada a uniformidade de campo, resulta que a potência que se propaga na célula (fluxo do vetor de Poynting, igual à potência aplicada), depende do quadrado do valor do campo elétrico. Assim, tem-se [18]:

$$P_{\text{teste}} = \frac{E^2_{\text{teste}}}{E^2_{\text{ref}}} \cdot P_{\text{aplicada}} \quad (2)$$

em que:

- Paplicada: potência do sinal aplicada à célula;
- Eref: campo elétrico obtido considerando a potência aplicada;
- Eteste: campo elétrico que se deseja obter;
- Pteste: valor da potência necessária para obter *E*teste.

Outro aspecto que a referida norma estabelece refere-se ao volume (dimensões) do ESE que pode ser introduzido na célula. Uma primeira consideração que a norma ressalta é que deve ser mantida uma altura de espaçamento entre o ESE e a base da célula maior que 0,05h (figura 5), de modo a evitar efeitos de acoplamento indesejado entre o equipamento e a célula. As dimensões máximas do equipamento não devem ser maiores do que 0,6w e 0,6L, (largura e comprimento) e sua altura não deve ser maior do que 0,33h (Figura 5).

No teste de imunidade em câmaras anecóicas, o campo elétrico incidente deve ser aplicado às 4 faces do ESE e em polarização de campo elétrico horizontal e vertical, Da mesma forma, no teste de imunidade no interior de uma célula TEM, o equipamento deve ser girado no plano horizontal de modo que suas 4 faces sejam atingidas diretamente, considerando como referências os ângulos de 0°, 90°, 180° e 270°. Além disso, como o campo elétrico produzido no interior da célula apresenta tipicamente polarização vertical, o ESE deve também ser girado no plano vertical, considerando novamente os ângulos de 0°, 90°, 180° e 270°.

Uma visão geral de tipos de células comerciais, com detalhes e aplicações, pode ser obtida no site da Referência [33]. O texto ressalta as aplicações em testes, avaliação de componentes, testes de pre-conformidade (durante o desenvolvimento do produto) e análise de blindagens.

A utilização de uma célula GTEM em teste de imunidade radiada é exemplificada em [34], que apresenta a comparação de resultados do teste realizado

com a célula (norma IEC 61000-4-20) e com uma câmara Semi-anecóica (Norma IEC 61000-4-3), na faixa de 80 MHz a 1 GHz. O ESE utilizado na comparação consistia numa caixa metálica de 20,5 cm x 30 cm x 30 cm com uma janela de 18 cm x 8 cm, uma antena disco em seu interior e mesmos cabos para os dois testes.

A célula GTEM tinha dimensões 7,95 m x 4,1 m x 2,9 m e foram utilizados gerador de RF, amplificador e acoplador direcional para a introdução do sinal na porta da célula e analisador de espectro para a medição do sinal resultante no ESE. A câmara, com dimensões 7,6 m x 3,3 m x 4,3 m tinha uma antena bilogarítmica como fonte de sinal, nas polarizações horizontal e vertical. Após a verificação da uniformidade de campo nos dois sistemas, foi realizado o teste em várias posições do ESE e a apreciável concordância de resultados permitiu concluir que a célula GTEM é uma alternativa válida.

Os circuitos Integrados (CIs) são fonte de interferência e apresentam, também, susceptibilidade a campos externos. A análise de CIs quanto à imunidade irradiada em célula TEM ou GTEM pode ser realizada com a orientação da Norma BS EN 62132-2:2011 (IEC 62132-2:2010) [35], cujos pontos principais são a seguir resumidos. O CI sob teste é montado em uma placa de circuito, que é introduzida numa abertura feita numa parede da célula, com o CI de frente para o septo. Assim, o CI fica exposto a um campo de onda plana produzido por um gerador de RF conectado à porta de entrada da célula. O equipamento recomendado compõe-se de gerador de RF, amplificador, atenuador (opcional), célula TEM (com segunda porta casada) ou GTEM, monitor de funcionamento do CI. Com o CI em operação normal, o campo no interior da célula é aumentado até observar-se falha de funcionamento ou mudança de consumo, instabilidade etc.

O teste é realizado na faixa de frequências de 150 kHz a 1 GHz, utilizando onda sem modulação e com modulação AM a 80% com sinal de 1 kHz.

O setor automotivo é uma área em que os testes de compatibilidade eletromagnética são constantemente realizados. Entre algumas metodologias existentes, podem-se citar as normas das série ISO 11452. Em particular, a ISO 11452-3 [36] trata especificamente de testes de imunidade irradiada em componentes automotivos utilizando-se a célula TEM, o que garante que os próprios fabricantes possam realizar testes preliminares em fase de desenvolvimento, mantendo a confidencialidade do projeto. A norma prevê a faixa de frequências de 0,01 a 200

MHz e variados níveis de campo elétrico, conforme apresentado na Tabela 2, relativa à classificação de severidade aplicada à categoria do equipamento em teste;

Tabela 2 - Níveis de ensaios da norma ISO 11452-3 (anexo E).

Frequência (MHz)	nível 1 (V/m)	nível 2 (V/m)	nível 3 (V/m)	nível 4 (V/m)	nível 5 (V/m)
0,01 a 10	50	80	150	200	Valor específico acordado entre os usuários desta norma
10 a 30	50	80	150	180	
30 a 80	60	100	120	180	
80 a 200	60	100	120	200	

Fonte: Tabela obtida de [36].

2.5 Métodos Computacionais

Os métodos de simulação utilizando computadores permitem a análise de campos eletromagnéticos quando uma solução analítica é impossível.

Dentre os diversos métodos disponíveis para a simulação computacional, podem-se destacar: método das Diferenças Finitas, com sua versão para campos variáveis no tempo FDTD (Finite Difference Time Domain), método dos Momentos MoM (Moment method), método dos Elementos Finitos FEM (Finite Element Method) e método dos Elementos de Fronteira BEM (Boundary element method).

A aproximação de derivadas por meio de relação de incrementos finitos é a base do método das Diferenças Finitas. A substituição dessa aproximação nas equações diferenciais que descrevem o problema dado origina um sistema linear cuja solução fornece valores de campo ou potencial em dados pontos de uma discretização da região analisada. No caso de campos variáveis, é também feita uma discretização do tempo (FDTD). Nesse caso, é particularmente eficiente o procedimento apresentado em 1966 por Kane S. Yee, que considera as equações de Maxwell e adota discretizações de tempo e de espaço deslocadas de meio intervalo para campos elétrico e magnético. Isto permite obter a solução das equações por um processo de “marcha” no tempo, obtendo-se alternadamente valores de campo elétrico e magnético [37]. Domínios “abertos”, como é o caso da análise de propagação de ondas em meios ilimitados podem ser analisados utilizando-se “camadas

absorvedoras” PML (Perfectly Matched Layer) situadas a distâncias convenientes, que evitam reflexões e absorvem a energia irradiada.

No método dos Momentos procura-se a solução de equações diferenciais ou integrais aproximando-se a função desconhecida por meio de “funções de expansão” - adotadas numa certa classe- e coeficientes numéricos a serem determinados. Adotando, ainda, “funções peso” e utilizando o conceito de “produto interno”, pode-se obter um sistema linear cuja solução fornece os valores dos coeficientes numéricos e, portanto, uma aproximação da função desconhecida. Normalmente, o método é aplicado no domínio da frequência, com funções de expansão definidas em cada elemento da discretização da região analisada e funções peso impulsivas definidas em pontos escolhidos. Isto corresponde a impor a validade da equação a ser resolvida nesses pontos. Um texto clássico que descreve o método é a referência [38].

No método dos Elementos Finitos a região a ser analisada é dividida em elementos de formas e tamanhos variados, o que dá ao método grande flexibilidade de representação de regiões com várias formas. A aplicação do método pode ser feita por dois processos: por Resíduos Ponderados ou por Funcionais. Em ambos, a função a ser determinada (solução da equação dada) é aproximada por funções de expansão definidas em cada elemento. No procedimento por resíduos ponderados adotam-se funções peso e um produto interno conveniente para impor que a diferença entre a equação com a solução exata e com a solução aproximada, “ponderada” pela função peso, seja nula.

No procedimento com funcionais, define-se uma expressão matemática (normalmente com significado de energia armazenada) que contém a função a ser determinada e cujo extremo (máximo ou mínimo) satisfaça a equação que descreve o problema dado. Assim, substitui-se a resolução da equação pela pesquisa de extremo da funcional. Como a função desconhecida está representada por funções de expansão e constantes a determinar, a imposição de extremo conduz a um sistema linear nessas constantes. A Referência [39] é um texto básico sobre o método.

O método dos Elementos de Fronteira apresenta a vantagem de exigir discretização apenas no contorno da região analisada, reduzindo o esforço computacional. A base do procedimento é a adaptação de uma determinada solução fundamental (que deve ser conhecida) ao contorno da região analisada [40]. Com isto, a aplicação do método não é simples, o que explica sua utilização ser bem menos frequente que a dos outros métodos.

Aplicação do método FDTD pode ser vista em [41], em que os autores estudaram a distribuição de campos numa célula TEM simétrica de dimensões 90 cm x 90 cm em sua secção central. Inicialmente, a célula foi analisada vazia e foram realizadas medições com sensor constituído por 3 antenas ortogonais, obtendo-se as componentes x, y e z. Verificou-se, também, a influência de um objeto metálico, introduzido na célula, sobre os campos. O tedioso trabalho de medição de campos na célula, para ter sua distribuição, pode ser substituído pela simulação computacional, que, além disso, é não invasiva.

A simulação foi realizada supondo uma fonte do tipo pulso gaussiano, cobrindo a faixa de frequências de 10 MHz a 1,2 GHz e adotando discretização espacial de 200 x 100 x 100 pontos. Vale ressaltar que o método FDTD permitiu obter, também, o campo magnético no interior da célula.

Programas comerciais podem ser adquiridos, contando com ferramentas de grande flexibilidade. Na utilização de Elementos Finitos, por exemplo, a discretização da região analisada é feita e otimizada de forma automática. Além disso, recursos gráficos variados permitem a visualização dos resultados. Dentre os vários softwares comerciais, o programa COMSOL Multiphysics [42] foi adotado neste trabalho. Ele utiliza Elementos Finitos e permite a solução de problemas envolvendo simultaneamente várias áreas da física (por exemplo, problema de distribuição de correntes e de fluxo de calor por elas produzido).

O uso de COMSOL para o estudo de eficácia de blindagem de uma caixa metálica de 291 mm x 277 mm x 243 mm com uma perfuração de 10 mm de diâmetro no centro da área 277 mm x 243 mm [43] é um exemplo de aplicação do software. Os autores compararam o desempenho de análises feitas em duas e três dimensões, na faixa de 500 MHz a 2,5 GHz. Os resultados das simulações computacionais foram verificados por medições numa câmara anecóica, com uma sonda de campo elétrico de pequenas dimensões.

2.6 Blindagem

A blindagem é constituída, normalmente, por um invólucro metálico que envolve totalmente um equipamento ou parte dele [1]. A blindagem tem função dupla: evitar que radiação gerada no equipamento alcance outros equipamentos e evitar que radiação proveniente do exterior atinja componentes internos. A eficácia de uma

blindagem SE (shielding effectivity) é definida pela relação, em dB, entre o campo elétrico (ou magnético) incidente na blindagem e o campo elétrico (ou magnético) transmitido através da blindagem. Assim, para campo elétrico:

$$SE = 20 \log E_i / E_t \quad (3)$$

em que:

E_i é o campo incidente na blindagem;

E_t é o campo transmitido através dela [1].

A análise conceitual simplificada do fenômeno pode ser realizada considerando uma parede de material bom condutor, com impedância intrínseca η , situada no ar (impedância $\eta_0 = 377$ ohms). Uma onda eletromagnética plana (supondo análise de campos distantes), que incide na normal nessa parede, dá origem a um campo refletido E_r , podendo-se calcular o coeficiente de reflexão:

$$\Gamma = E_r/E_i = (\eta - \eta_0)/(\eta + \eta_0) \quad (4),$$

Isto significa que uma parte da energia incidente retorna para o ar, reduzindo a intensidade de campo da onda que penetra na parede, com coeficiente de transmissão dado por:

$$T = 2 \eta / (\eta + \eta_0) \quad (5).$$

Essa onda transmitida, por sua vez, será atenuada ao atravessar o material, segundo um fator $\exp(-\Delta/\delta)$, sendo δ a profundidade pelicular do material da parede e Δ sua espessura. Observe-se que ao atingir a outra face da parede, a onda sofrerá nova reflexão, pela mudança de meio (material-ar), havendo outra redução na intensidade de campo, ao ser transmitido pela parede (esta onda refletida dará origem a múltiplas reflexões dentro da parede). Isto significa que o efeito de blindagem é devido a uma redução do valor do campo provocada por reflexões nas duas faces da parede e, também, pela atenuação dentro da parede.

Uma análise mais detalhada [1], considerando material bom condutor, com condutividade σ e permeabilidade $\mu = \mu_r \cdot \mu_0$, permite obter expressões para a atenuação por reflexões

$$R_{dB} = 20 \log \left(\frac{1}{4} \sqrt{\frac{\sigma}{\omega \mu r \epsilon_0}} \right) \quad (6),$$

e para a atenuação por perdas (absorção) na parede de espessura Δ :

$$A_{dB} = \frac{8,686 \Delta}{\delta} \quad (7),$$

Sendo δ a profundidade pelicular do material da parede, calculada por

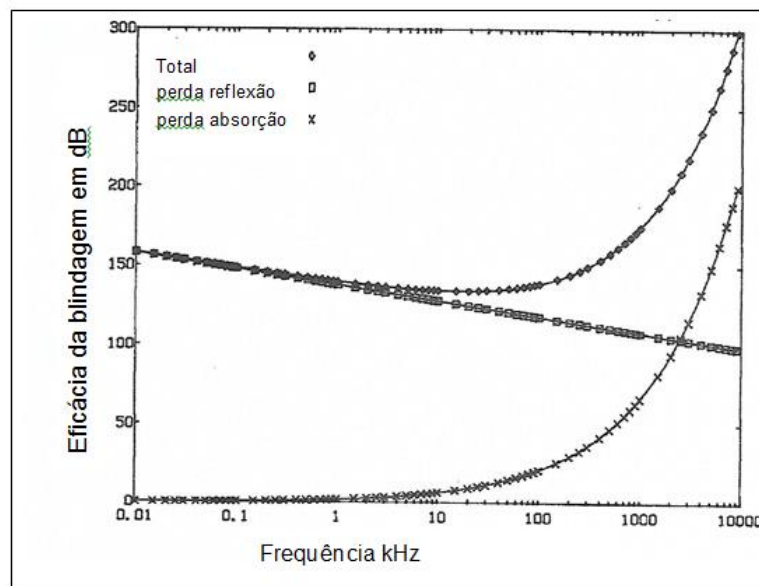
$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (8).$$

A eficácia da blindagem (em dB) é obtida somando as atenuações por reflexão e por dissipação:

$$SE = R_{dB} + A_{dB} \quad (9).$$

Considerando o caso de uma parede de cobre de espessura $50,8 \times 10^{-3}$ cm (20 mils), as expressões (7), (8) e (9) permitem obter a eficácia de blindagem na faixa de frequências de 10 Hz a 10 MHz, como se vê na figura 6 que indica separadamente as partes correspondentes às reflexões e à dissipação (absorção) [1]. Observa-se que em frequências muito altas a dissipação é um fator importante no efeito de blindagem.

Figura 6 - Eficácia de blindagem de parede de Cobre de $50,8 \times 10^{-3}$ cm

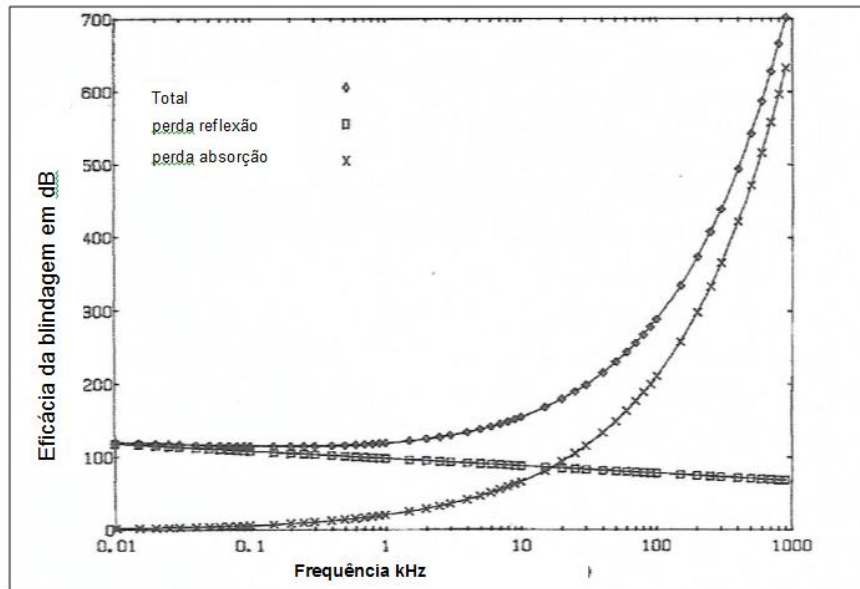


Fonte: Figura obtida de [1].

Para o caso de uma parede de aço SAE 1045, que difere do cobre por ter permeabilidade muito elevada (μ_r da ordem de 1000), apesar de ter também alta condutividade (da ordem de um décimo da do Cobre), o comportamento da eficácia de blindagem para a mesma espessura de $50,8 \times 10^{-3}$ cm pode ser vista na figura 7, também adaptada de [1]. A faixa de frequências é de 10 Hz a 1 MHz.

Observa-se também a dominância do efeito de perdas na faixa de frequências mais altas, em que a eficácia da blindagem do aço é mais alta do que a do cobre.

Figura 7- Eficácia de blindagem de parede de Aço SAE 1045 de $50,8 \times 10^{-3}$ cm



Fonte: Figura obtida de [1].

Se as fontes de interferência são próximas (distância r do ponto considerado à fonte muito menor do que o comprimento de onda), caracterizando um problema de campo próximo, a onda incidente não é plana e a impedância de onda é diferente para o caso de fonte dipolo elétrico (Z_e) ou dipolo magnético (Z_m). Essas impedâncias são dadas, de forma aproximada por [1]:

$$Z_e \approx 1/2\pi f \epsilon_0 r \quad (10)$$

$$Z_m \approx 2\pi f \mu_0 r \quad (11)$$

Esses valores são usados para o cálculo da atenuação por reflexão, enquanto que a atenuação por perdas permanece como já anteriormente considerada.

A eficácia de blindagens é reduzida pela presença de aberturas, mas seu cálculo é complicado, sendo o problema normalmente analisado por simulação computacional, da qual o trabalho [43] é um exemplo.

Isto também é visto em outro texto [44], em que os autores tratam da imunidade irradiada de um equipamento ainda na fase de seu desenvolvimento, considerando o efeito de blindagem do gabinete. A eficácia de blindagem de painéis com diferentes tipos de aberturas é analisada por simulação computacional por Elementos Finitos, utilizando o software COMSOL®. No ambiente computacional, em que uma câmara virtual com camadas PML foi criada, um painel de blindagem é irradiado por uma onda

TEM e a eficácia da blindagem é calculada pela relação entre os valores de campo elétrico sem e com blindagem.

Para validação do procedimento, a simulação é realizada primeiramente com um único furo circular no painel e os resultados obtidos são comparados com a solução analítica. Em seguida, é analisado o efeito da subdivisão de uma abertura circular única num conjunto de aberturas menores, verificando-se uma melhora na eficácia da blindagem com este procedimento. O mesmo é feito com aberturas retangulares, observando-se, agora, que o comportamento é dependente da polarização da onda TEM incidente. O artigo mostra, ainda, o efeito benéfico da subdivisão de uma ranhura longa em várias ranhuras menores.

A extensa bibliografia existente, da qual apenas uma pequena parte foi aqui apresentada, mostra a importância do tema e o interesse em se realizar uma avaliação da interferência eletromagnética de forma adequada, a baixo custo.

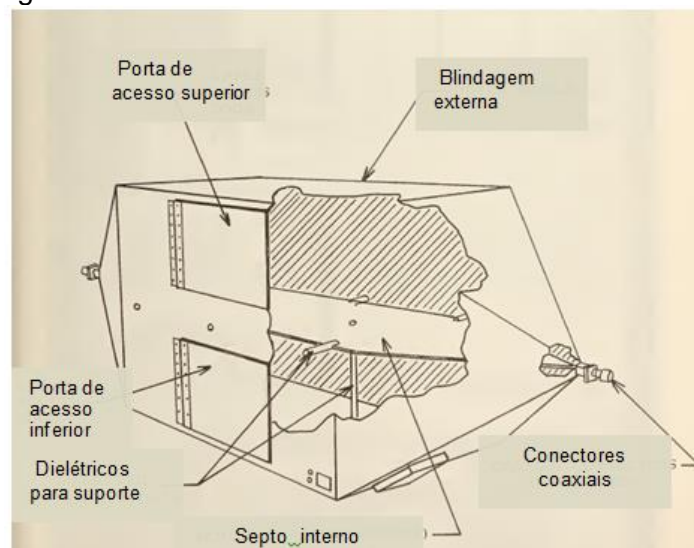
3. Célula TEM construída

A célula TEM pode ser entendida como uma expansão de uma linha de transmissão coaxial, com duas paredes comportando-se como o condutor externo da linha e um septo como condutor interno. A tensão aplicada à célula é convertida num campo que se propaga em seu interior e que pode ser utilizado para testes de imunidade; inversamente, a energia radiada em seu interior é convertida em tensão, para testes de emissão. Campos elétricos de alta intensidade podem ser obtidos, tipicamente na ordem de até 500 V/m, sendo que em alguns modelos de célula de menores dimensões esse valor pode chegar até a 1,4 kV/m.

3.1 Estrutura da célula

Os dois condutores externos da célula limitam um volume que tem a forma de um paralelepípedo com duas partes afuniladas nas suas extremidades, para realizar uma transição suave entre a parte com paredes retangulares e os conectores em ambas extremidades. A Célula também pode ser inteiramente fechada, como se vê na figura 8 apresentada em [45]. Ela apresenta melhor blindagem, mas deve ter portas de acesso, feitas com os cuidados usuais para que a blindagem não seja afetada (uso de *gaskets*).

Figura 8 - Célula TEM fechada

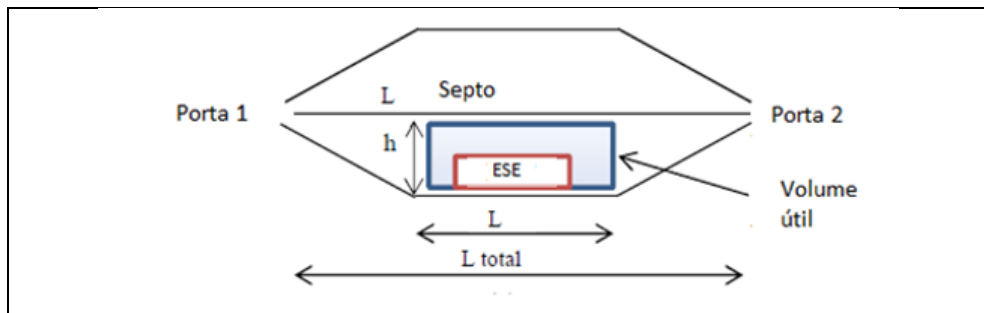


Fonte: Figura obtida de [45].

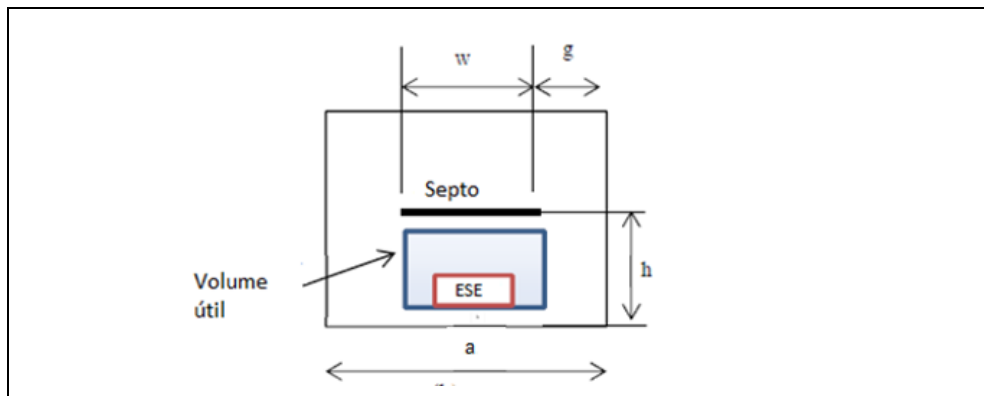
A célula inicialmente construída para este trabalho é aberta e tem como base a célula apresentada em [46], com o septo dividindo seu volume de forma simétrica. A figura 9 apresentada em [47] detalha a estrutura da célula e na Tabela 3 estão dadas suas dimensões.

Figura 9 – Dimensões da célula construída (a) vista lateral; (b) vista frontal.

a)



b)



Fonte: Figura obtida de [47]

Na figura 9 estão, também, indicados o volume útil, definido em função da uniformidade de campo elétrico, de acordo com a Norma IEC 61000-4-20, e o posicionamento de um equipamento sob ensaio (ESE), ainda de acordo com a mesma norma.

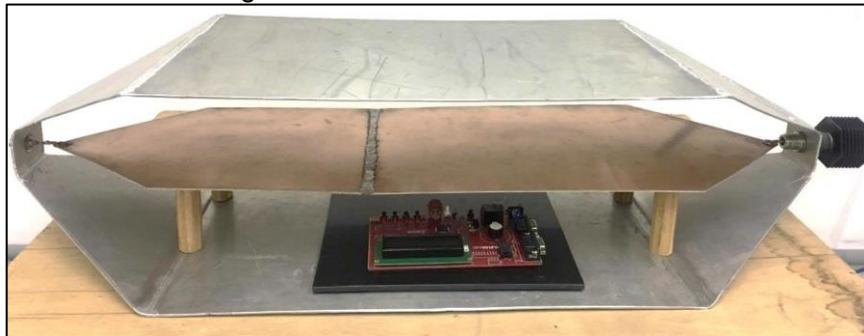
Tabela 3 - Dimensões da célula TEM construída.

Dimensões	(mm)
L	450
L total	762
L septo	750
h	90
w	214
g	43
a	300

Fonte: Tabela obtida de [47].

Pode-se ter, na figura 10 abaixo, uma visão geral da célula construída. Em seu interior está inserido um ESE para a realização de testes.

Figura 10 - Célula TEM construída



Fonte: Autor.

Um parâmetro importante da Célula é sua impedância característica, cujo cálculo não é simples, dada a complexidade da geometria. Por exemplo, em [45], para célula fechada, o autor propõe a expressão:

$$Z_0 = \frac{376,7}{4 \left[\frac{a}{b} - \frac{2}{\pi} \ln \left(\sinh \frac{\pi g}{2b} \right) \right]} - \frac{\Delta C}{\epsilon_0} \quad (12)$$

Na equação acima, a e b são a metade da largura e altura da célula, respectivamente, e g é o espaçamento entre cada beira do septo e a respectiva parede lateral da célula. O termo ΔC é a capacitância de dispersão entre septo e paredes.

Para a célula aberta construída, considerada como uma *strip line*, a expressão aproximada proposta em [5], para o meio ar (ϵ_0 , μ_0), resulta em:

$$Z_0 = \frac{94,15}{\left[\frac{w}{b(1-\frac{t}{b})} + \frac{Cf}{0,0885} \right]} \quad (13),$$

em que w é a largura do septo, t sua espessura e b é a altura da célula. Cf representa a capacitância de dispersão entre septo e paredes superior ou inferior (um quadrante), dada em pF/cm. A expressão (13) é obtida considerando que Z_0 é calculada por

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (14),$$

sendo L e C a indutância e a capacitância por metro da estrutura, respectivamente. Ainda, a velocidade de propagação na *strip line* (meio ar) é dada por

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = \frac{1}{\sqrt{LC}} = 3 \times 10^8 \text{ m/s} \quad (15),$$

De (14) e (15) resulta

$$Z_0 = \frac{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}{C} \quad (16),$$

de forma que basta conhecer a capacitância C por metro entre os condutores da célula para determinar Z_0 . Esse valor é constituído pela capacitância entre o septo e as partes dos condutores superior e inferior imediatamente acima e abaixo do septo (C_1) e a capacitância de dispersão entre o septo e a parte lateral restante desses condutores (C_d).

Supondo espessura do septo desprezível, a capacitância C_1 pode ser calculada por

$$C_1 = 2 \frac{\epsilon_0 w \cdot 1}{b/2} = 4 \cdot \frac{\epsilon_0 w}{b} \quad (17),$$

enquanto que C_d é igual a 4 vezes a capacitância de dispersão de um quadrante da geometria (Cf), o que leva à expressão (13). Uma avaliação aproximada de Cf é proposta em [48], que considera os condutores superior e inferior com largura muito grande, de forma que resulta, então,

$$Cf/\epsilon_0 = 0,4413 \quad (18).$$

Com isto, a impedância característica aproximada é igual a 58 Ω . A título de comparação, vale notar que com o valor de Cf proposto em [46], igual 0,053 pF/cm, resulta Z_0 igual a 52,6 Ω . Apesar de uma melhor avaliação de Cf poder ser feita, o

fato de se tratar de uma estrutura não uniforme limita a determinação precisa de Z_0 , como se verá adiante. Com os valores aproximados obtidos, entretanto, pode-se realizar um casamento de impedâncias aproximado, que permite a utilização da célula na análise da imunidade irradiada.

3.2 Caracterização experimental e simulação computacional

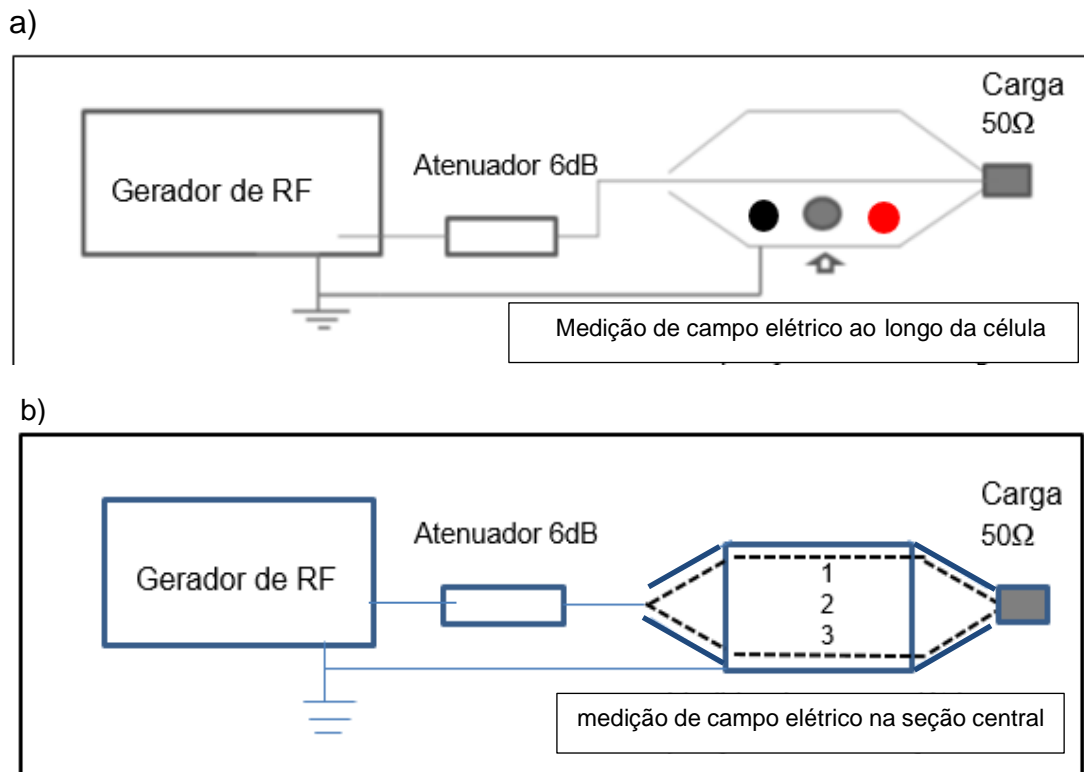
Para a utilização da célula deve-se inicialmente determinar alguns parâmetros que a caracterizam, tais como distribuição de campo elétrico em seu interior, impedância característica e taxa de onda estacionária (VSWR). Essa caracterização foi realizada de forma experimental e, também, utilizando o programa computacional Comsol.

3.2.1 Medições

Uma vez que a célula será utilizada para análise da imunidade de equipamentos à radiação externa, é fundamental que o campo elétrico em seu interior tenha intensidade e distribuição adequadas. Para o estudo de campos elétricos no interior da célula, foi montado o arranjo visto na figura 11 a), com gerador de sinais de RF da marca EM TEST modelo CWS 500, conectado à entrada da célula através de um atenuador de 6 dB e a terminação da célula acoplada a uma carga resistiva de 50 Ω .

O campo elétrico é medido com um sensor isotrópico Narda modelo EMR, inserido no interior da célula inicialmente na posição central e depois deslocado em direção à carga e ao gerador, como representado na figura 11 a). Uma segunda avaliação da distribuição do campo também foi realizada, considerando os pontos 1, 2 e 3 da seção central da célula, como representado na figura 11 b). O sensor utilizado é apresentado com mais detalhes no item 4.1 Sensores de campo.

Figura 11 - Esquema de excitação e medição. a) Posicionamento do sensor ao longo da célula; b) Vista superior da célula e posicionamento do sensor nos pontos 1,2 e 3 da seção.

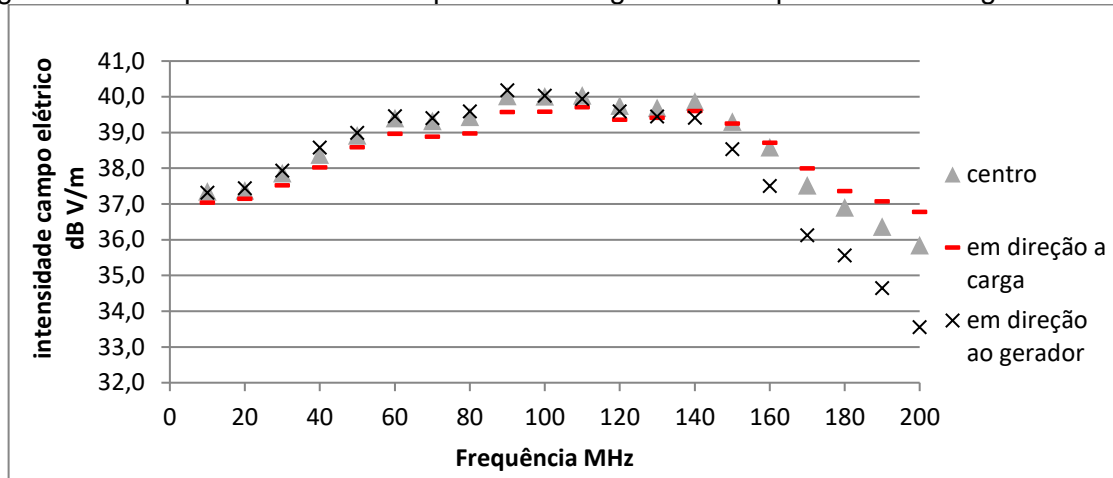


Fonte: Autor.

Ajustando o nível do gerador em 1V, 3V e 10V, na faixa de frequências de 10 a 200 MHz, foi medido inicialmente o campo elétrico apenas no ponto central. Observou-se que para a faixa de frequências de aproximadamente 10 a 200 MHz, os valores obtidos chegam a atingir, respectivamente para as três tensões do gerador, os valores 20 dBV/m, 30 dBV/m e 40 dBV/m, que correspondem a 10 V/m, 31,6 V/m e 100 V/m. Esses valores estão próximos dos que se calculam pela divisão do valor da tensão aplicada pela distância septo-parede superior ou inferior (0.09 m). Ressalte-se o valor apreciável de campo que pode ser obtido para ensaios (100 V/m).

Visando analisar a uniformidade do campo elétrico, item constante nas Normas de utilização da célula, inicialmente foram medidos os valores de campo - em várias frequências - em três posições ao longo da linha média da célula: posição central, na direção da carga e na direção do gerador. A tensão do gerador foi fixada em 10 V. Os resultados são vistos na figura 12.

Figura 12 - Campo elétrico em três pontos ao longo da célula para tensão do gerador 10 V.

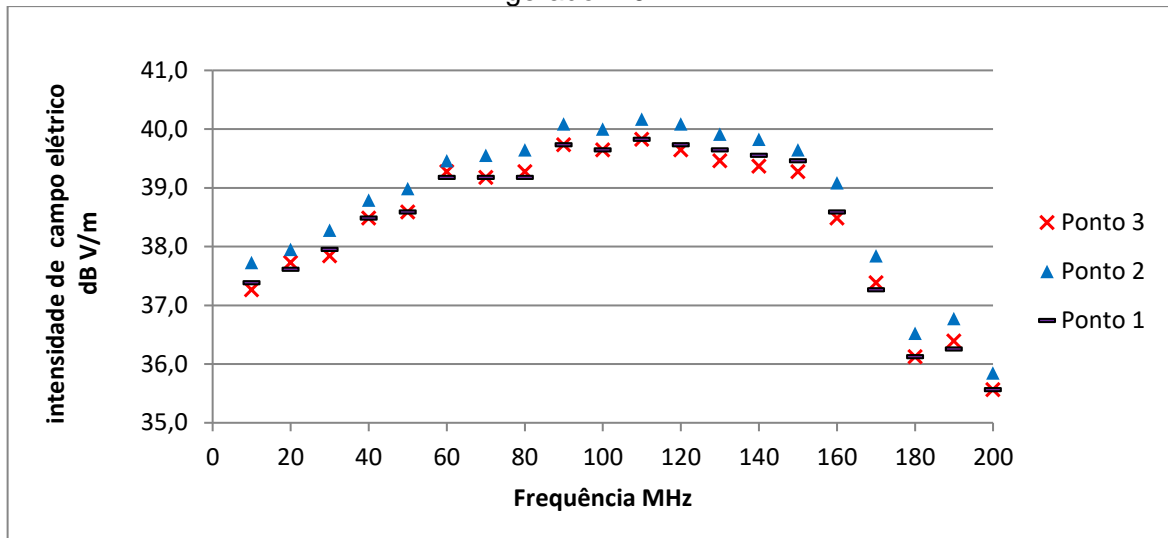


Fonte: Autor.

Observa-se, na figura 12, que a distribuição do campo elétrico não apresenta a desejada uniformidade ao longo da célula, requerida para os testes de imunidade. A falta de uniformidade do campo será investigada mais profundamente, em medições associadas à determinação da impedância característica e da VSWR. Serão, então, adotadas medidas para o aperfeiçoamento da célula.

Ainda com base no exposto na Norma IEC 61000-4-20 quanto à uniformidade de campo numa seção, as medições foram repetidas, com tensão de gerador de 10V, em três pontos da seção central da célula, a saber: ponto 1- à esquerda da linha central, ponto 2 - na linha central e ponto 3 -à direita da linha central, definidos olhando-se do gerador para a carga. O sensor de campo elétrico foi colocado à meia altura no espaço inferior da célula. A figura 13 apresenta os resultados obtidos, sendo possível observar que o ponto central (ponto 2) apresenta o maior valor de intensidade de campo, enquanto que seus simétricos (pontos 1 e 3) apresentam intensidade menor, na mesma proporção como esperado.

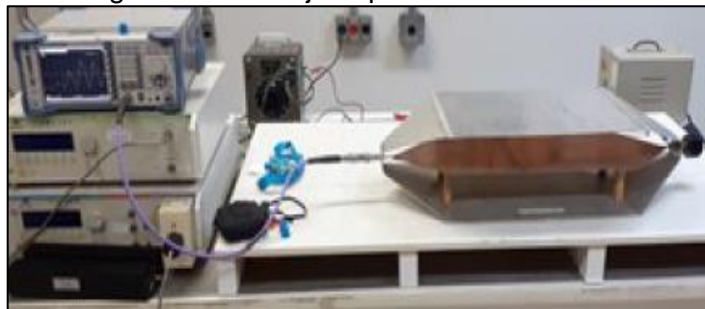
Figura 13 - Variação do campo elétrico na seção transversal da célula, com tensão de gerador 10 V



Fonte: Autor.

Para caracterizar a célula quanto à impedância característica e taxa de onda estacionária (VSWR- *voltage standing wave ratio*) com carga nominal de 50Ω , foram realizadas medições utilizando o VNA (*Vector Network Analyzer*) conforme mostra a figura 14. Utilizaram-se frequências de até cerca de 200 MHz, faixa em que se pretende usar a célula. Os resultados obtidos podem ser vistos na figura 15.

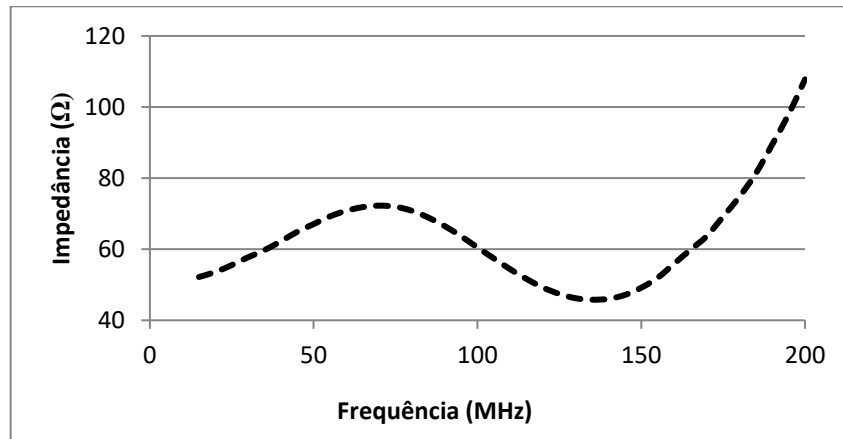
Figura 14 - Arranjo experimental com VNA



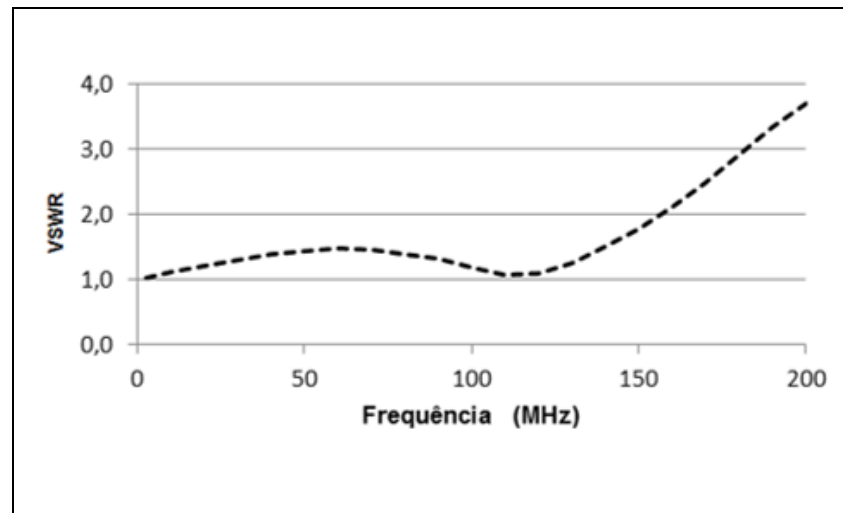
Fonte: Autor.

Figura 15 - Medições com VNA (a) Impedância de entrada da célula; (b) taxa de onda estacionária (VSWR). Carga: 50 Ω .

(a)



(b)



Fonte: Autor.

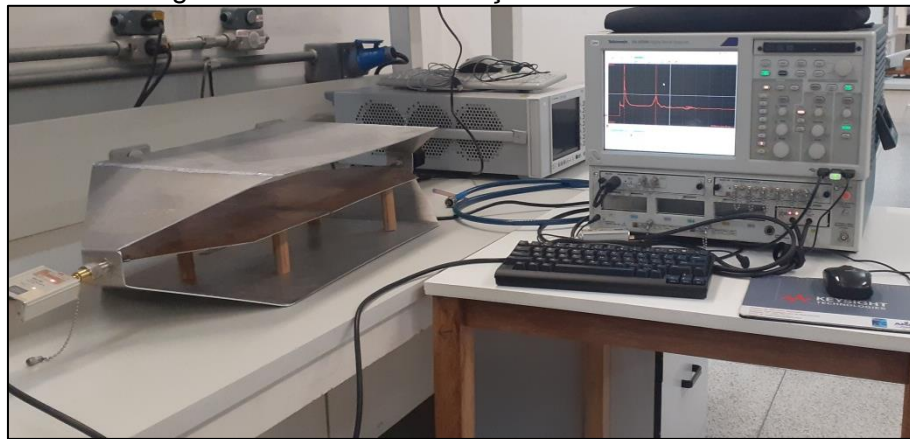
Na figura 15 (a) observa-se que a impedância de entrada é da ordem de Z_0 anteriormente estimado, até cerca de 150 MHz, indicando haver casamento de impedâncias razoável, o que é confirmado pela figura 15 (b), em que a VSWR fica limitada ao valor 2 até cerca de 150 MHz. Acima desta frequência, entretanto, a VSWR aumenta até um valor próximo de 4 para frequência de 200 MHz, valor muito acima do recomendado pela norma 61000-4-20, que é de 1,3.

Esse comportamento da VSWR influi na uniformidade do campo elétrico gerado no interior da célula, fazendo com que o campo elétrico observado ao longo do eixo longitudinal na frequência de 200 MHz apresente variações de 3,2 dBV/m. Isto devido às reflexões provocadas pelo fato de não haver casamento de impedância da célula.

Observe-se, ainda, que a determinação experimental da impedância característica da célula através da medição da impedância de entrada com a saída em curto circuito e em circuito aberto apresenta dificuldade pelo fato de tratar-se de uma linha não uniforme.

Considerando essa condição, foram realizadas medições com equipamento de TDR (*Time Domain Reflectometry*), que permite a análise da impedância ao longo de toda a célula, possibilitando, assim, identificar os pontos em que a impedância difere do valor desejável de 50 ohms. A figura 16 mostra a montagem experimental com o equipamento TDR [49].

Figura 16 - Vista das medições com TDR



Fonte Autor.

A figura 17 abaixo mostra os resultados obtidos com a técnica TDR para a impedância em cada ponto da célula. Verifica-se que existe uma região (mais central) da célula com impedância próxima de 50 ohms, como desejado, mas nas extremidades a impedância assume valores muito elevados: 253,4 ohms na transição da entrada e 103,4 ohms na porta de saída.

Figura 17- Impedância ao longo da célula



Fonte: Autor.

A técnica TDR permitiu localizar os trechos de maior descasamento de impedância, que correspondem à transição conector/septo na entrada e na carga. Isto levou à reconfiguração das extremidades do septo, alterando sua forma de modo a resultar uma transição mais suave. Na célula original o septo era pontiagudo e estava mais afastado do terminal do conector, como se vê na figura 18 a).

Com isto em mente, foi então desenvolvido um novo Septo de formato mais largo, colocado mais próximo dos conectores, como se vê na figura 18 b).

Figura 18 - Detalhe do septo a) Septo da célula original; b) Septo da célula modificado.



Fonte: Autor.

Utilizando novamente o TDR, foram obtidos os resultados vistos na figura 19 para a impedância ao longo da célula.

Figura 19 - Variação da impedância ao longo da célula com novo septo.

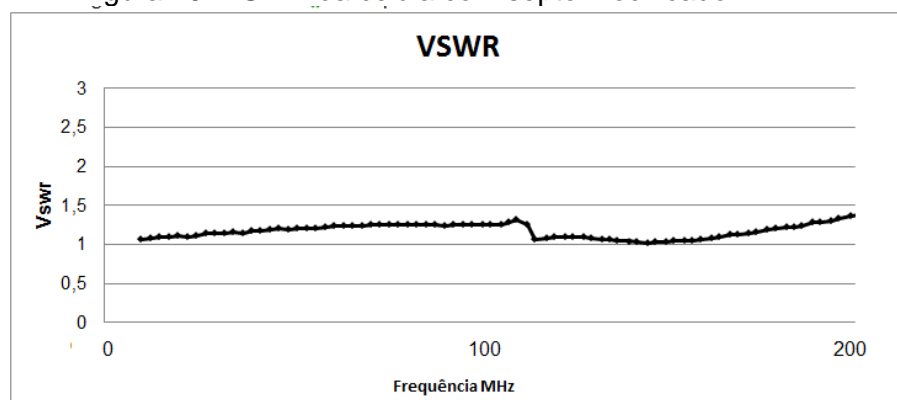


Fonte Autor.

Observa-se que o novo formato do septo resultou em melhoria significativa em relação ao casamento de impedância. A impedância ao longo da célula apresenta um valor aproximado de 76 Ω na entrada e de 53 Ω na saída. Vale lembrar que com o septo original o valor máximo era de cerca de 253 Ω .

Este novo comportamento da célula é confirmado pela medição da VSWR, que agora apresentou valores de até 1,3 em toda faixa de frequências avaliada (até 200 MHz), como se vê na figura 20.

Figura 20- VSWR da célula com septo modificado.



Fonte: Autor.

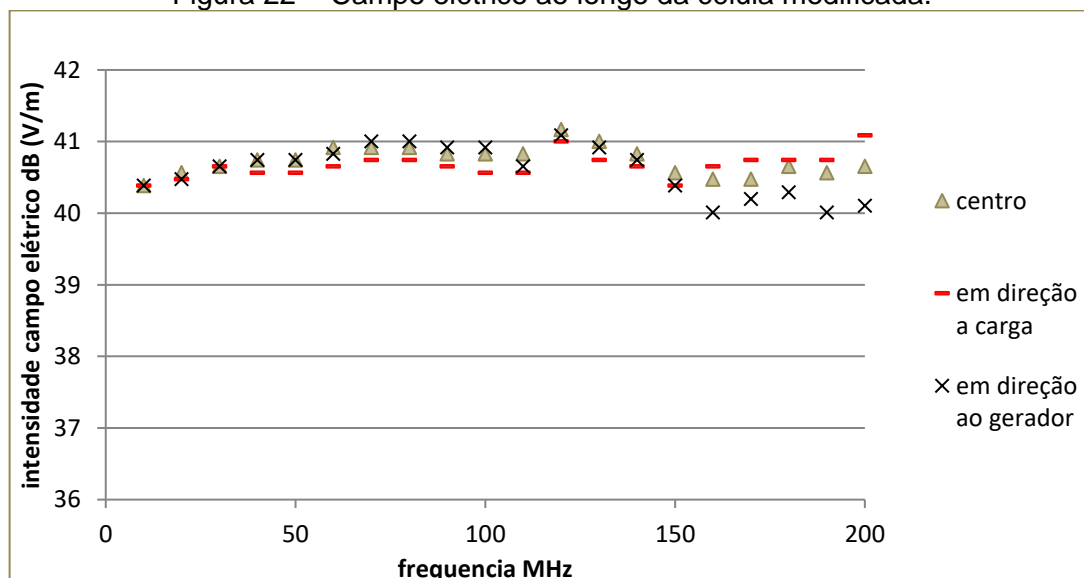
Voltando a atenção à uniformidade do campo no interior da célula, foram novamente determinados os valores de campo elétrico, por medição realizada no interior da câmara blindada do IPT (maior segurança das medições em relação a interferências). Constatou-se, agora, uma variação muito menor do que a observada anteriormente (com septo original). A figura 21 mostra a montagem experimental utilizada, detalhando a posição dos pontos de medida ao longo da célula. A tensão do gerador foi ajustada em torno de 10 V na entrada da célula, de forma a obter campo elétrico da ordem de 100 V/m (40 dBV/m). Os resultados obtidos podem ser vistos na figura 22.

Figura 21- Medição do campo na célula com septo modificado. Posição dos pontos de medida ao longo da célula.



Fonte Autor

Figura 22 - Campo elétrico ao longo da célula modificada.

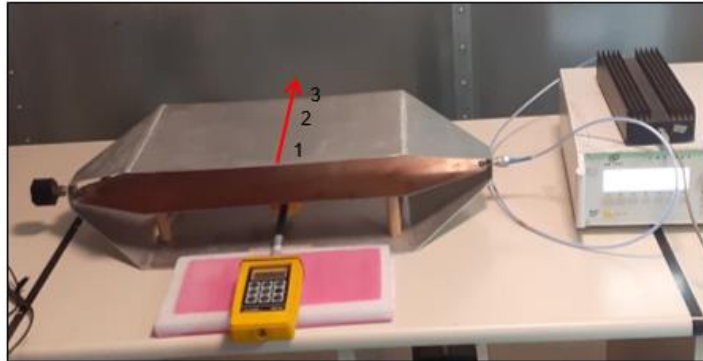


Fonte Autor

Observa-se que o campo elétrico na linha longitudinal da célula apresenta, agora, variação dentro de 1 dBV/m, o que está de acordo com o valor menor da VSWR obtido na nova célula.

A uniformidade de campo na seção transversal também foi verificada, considerando os pontos 1, 2 e 3 mostrados na figura 23.

Figura 23- Medição do campo na seção transversal.



Fonte Autor

Para a frequência de 100 MHz, na posição central da célula, para os pontos 1, 2 e 3 foram obtidos os valores 39,8 dBV/m, 40 dBV/m e 39,8 dBV/m, respectivamente, sendo constatada uma variação menor que 1 dB entre os pontos, o que atende ao critério de uniformidade de campo da Norma.

3.2.2 Simulação computacional

As simulações foram realizadas utilizando o software COMSOL, que tem como base o método dos elementos finitos (FEM). No software, deve-se representar detalhadamente a geometria a ser analisada, caracterizar o material de cada região e definir o fenômeno físico que rege o problema.

Foi utilizado o módulo RF de simulação, selecionando o pacote de estudo de ondas eletromagnéticas no domínio da frequência.

Representando a geometria do protótipo construído, as partes da estrutura em alumínio e a chapa de PCI cobreada (septo) foram consideradas como condutor elétrico perfeito (PEC), para otimização do processamento. A estrutura modelada pode ser vista na figura 24(a). Tratando-se de um problema em domínio aberto, a célula foi envolvida por uma camada PML (*perfectly matched layer*) de forma cilíndrica por se aproximar melhor do formato da estrutura da célula (figura 24 (b)), para absorção das ondas que se propagam para o exterior do domínio, e na face frontal e

na final do modelo foi adicionada a condição de contorno scattering boundary condition que também tem como finalidade evitar reflexões.

A PML tem diâmetros interno e externo de 2,8 m e 4,0 m, respectivamente e sua extensão é de 0,96 m. O meio considerado é o ar, exceto na região da PML, que é um domínio anisotrópico, com valores complexos de permissividade e permeabilidade.

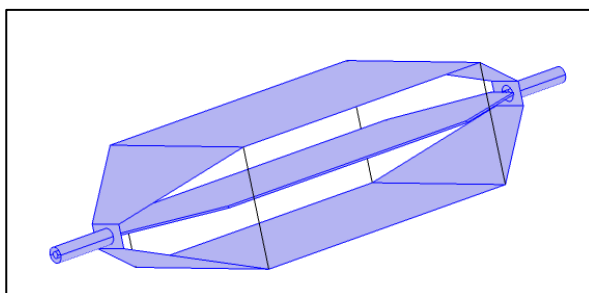
A excitação da célula foi realizada através da porta do tipo coaxial com tensão de 10 V, sendo imposto o valor de 50Ω tanto para a impedância interna do gerador como para a impedância de carga. Após a geração de malha, foi realizado o processamento para análise do campo elétrico no interior da célula, na faixa de frequências de 10 MHz a 200 MHz.

Considerando a região central entre a base da célula e o septo para análise do campo elétrico, na frequência central de 100 MHz foi obtido o valor de até 125 V/m (41,9 dB(V/m)) para uma tensão de alimentação de 10 V na entrada coaxial, como mostrado na figura 25, em vistas lateral e superior (corte longitudinal) e na seção central. Os valores obtidos estão de acordo com aqueles obtidos na caracterização experimental.

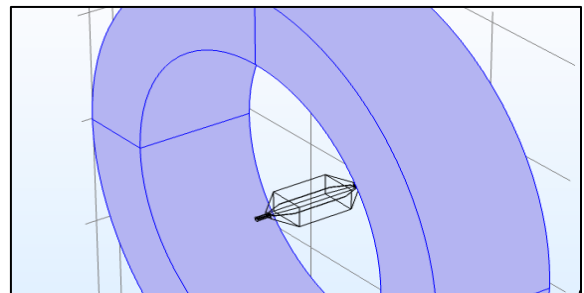
Foram, também, realizadas simulações com tensões de excitação de 1 V e 3 V, obtendo-se resultados proporcionais, como esperado.

Figura 24 - Simulação em COMSOL (a) Célula TEM; (b) Camada PML;

(a)



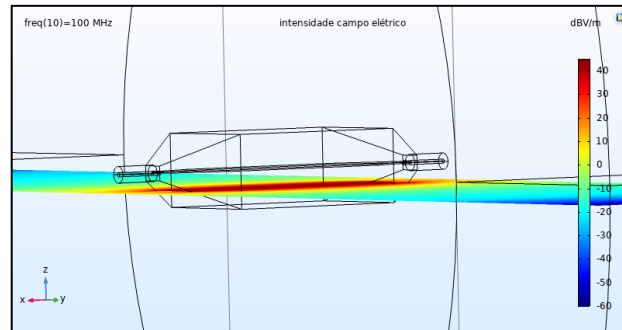
(b)



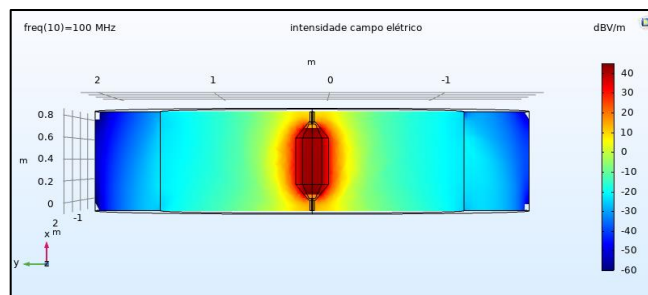
Fonte: Autor .

Figura 25 - Campo elétrico em 100 MHz com tensão de gerador em 10 V: (a) vista lateral; (b) vista superior e (c) seção central.

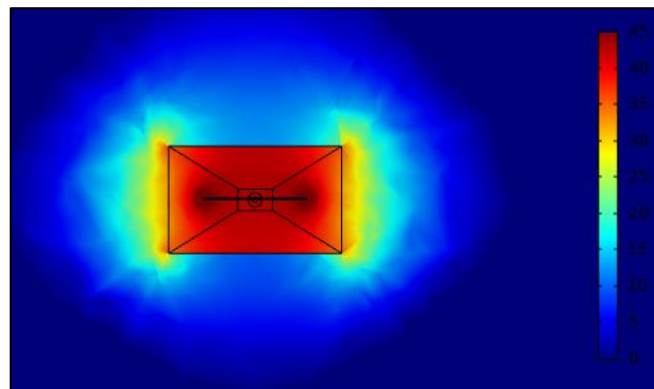
(a)



(b)



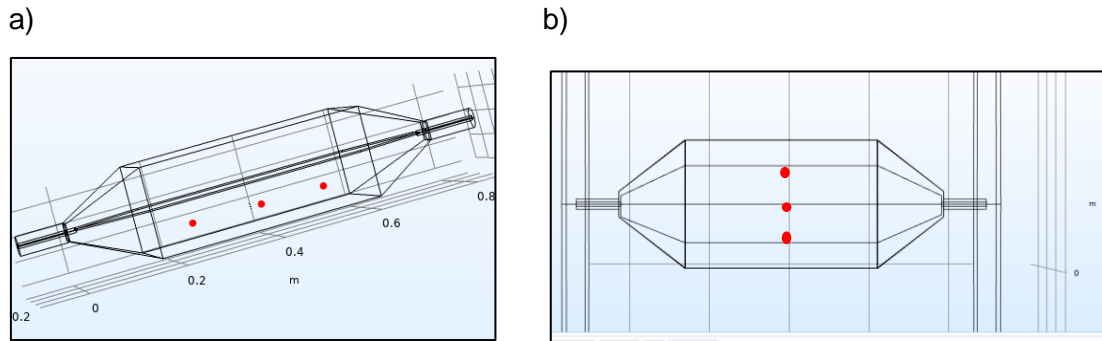
(c)



Fonte: Autor.

Em simulação realizada com tensão de gerador 10 V, foram considerados 3 pontos de avaliação de intensidade de campo tanto ao longo da célula quanto na seção transversal. Esses pontos estão representados em vermelho nas figuras 26 (a) e 26 (b).

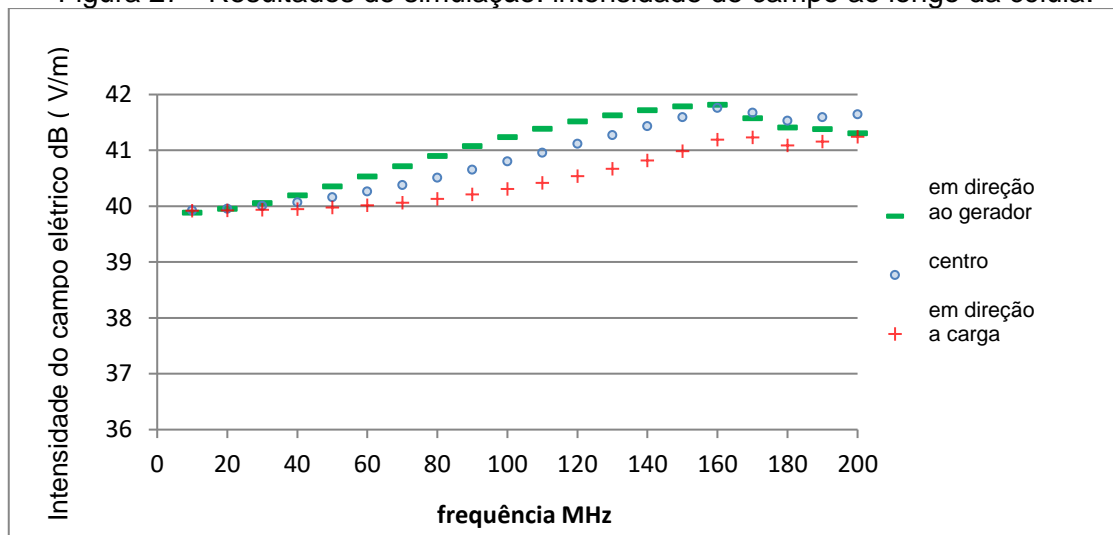
Figura 26 - Pontos de avaliação de campo elétrico. (a) ao longo da célula;(b) na seção central.



Fonte: Autor.

A figura 27 mostra os resultados obtidos para o campo ao longo da célula TEM.

Figura 27 - Resultados de simulação: intensidade de campo ao longo da célula.



Fonte: Autor.

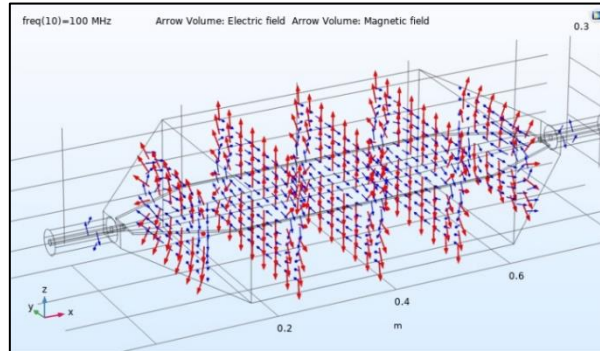
Observa-se que o resultado da simulação é compatível com os valores obtidos por medição, apresentados na figura 22, dentro de uma variação de 1 dB.

Vale ressaltar, também, que a simulação na seção central da célula, para frequência de 100 MHz, apresentou, respectivamente para os pontos 1, 2 e 3, os valores de 40,2 dBV/m, 40,8 dBV/m e 40,2 dBV/m, valores compatíveis com os resultados experimentais.

Ainda com relação ao uso da célula, é importante verificar, não só a uniformidade do campo na região de utilização, como, também, o modo de propagação, que deve ser TEM. Para isto, foi realizada a simulação em 100 MHz cujo resultado aparece na figura 28. Pode-se observar, na região central, a dominância do campo elétrico “vertical” (linhas vermelhas - E_z) e, também, a distribuição de campo

magnético (linhas azuis - H_y), que caracterizam a existência de onda TEM na parte utilizável da célula.

Figura 28 - Campos elétrico e magnético ao longo da célula, em 100 MHz

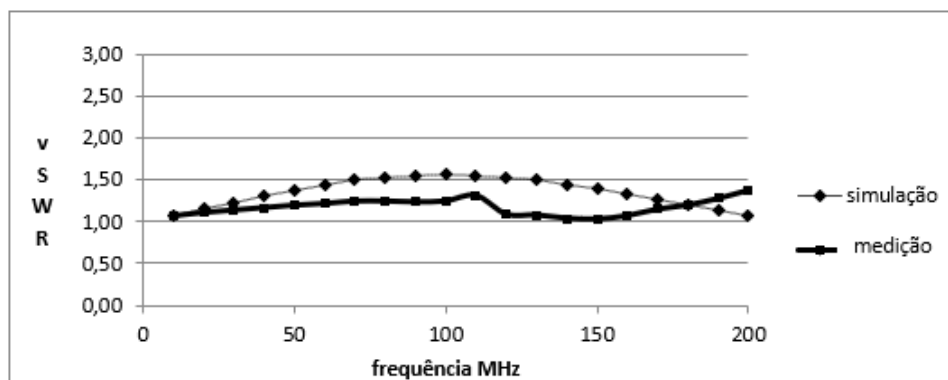


Fonte: Autor

Após o processamento do modelo, o software permitiu obter valores de VSWR, com carga de 50Ω , na faixa de frequências utilizada. A figura 29 permite comparar os valores obtidos por simulação com aqueles obtidos experimentalmente, verificando-se uma boa concordância entre eles, levando em conta a dificuldade de simulação precisa das conexões do gerador e da carga. De qualquer forma, os valores obtidos indicam um adequado casamento de impedâncias.

A figura 29 apresenta os valores experimentais e de simulação de VSWR:

Figura 29 - Valores experimentais e de simulação de VSWR:



Fonte: Autor.

Os resultados obtidos na caracterização da célula mostram sua adequação a utilização em ensaios de imunidade irradiada, a ser exemplificada com uma aplicação no capítulo a seguir.

4. Aplicação em testes de imunidade irradiada

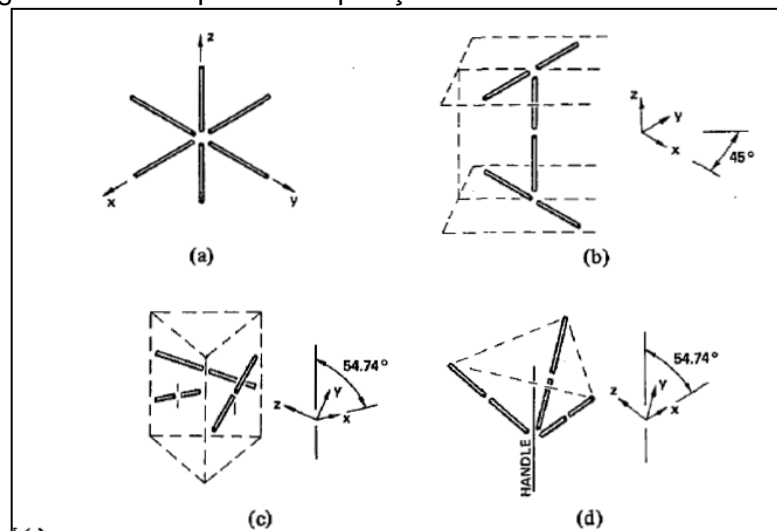
Neste capítulo analisa-se a utilização da célula TEM em ensaio prévio de imunidade irradiada de um equipamento de pequenas dimensões, comprovando-se a viabilidade dessa aplicação por meio de comparação entre resultados obtidos na célula, numa câmara anecóica e por simulação computacional. A grandeza fundamental a ser determinada é o campo elétrico, de modo que na seção a seguir são resumidas as informações importantes relativas aos sensores de campo disponíveis e utilizados nos ensaios.

4.1 Sensores de campo elétrico

Os sensores para medida de campo elétrico são constituídos, em geral, por um conjunto de antenas do tipo dipolo, um detector de RF e, conectado por uma linha de transmissão, um dispositivo para leitura das intensidades de campo. Sensores de campos podem medir intensidades variando de 1 a mais de 1000 V/m (rms) [50].

A disposição das antenas, em algumas configurações, é apresentada na figura 30. Os elementos são dispostos de forma mutuamente ortogonal, podendo ter um centro comum ou estar deslocados. Esta disposição torna o sensor isotrópico.

Figura 30 - Exemplos de disposição dos elementos dos sensores.



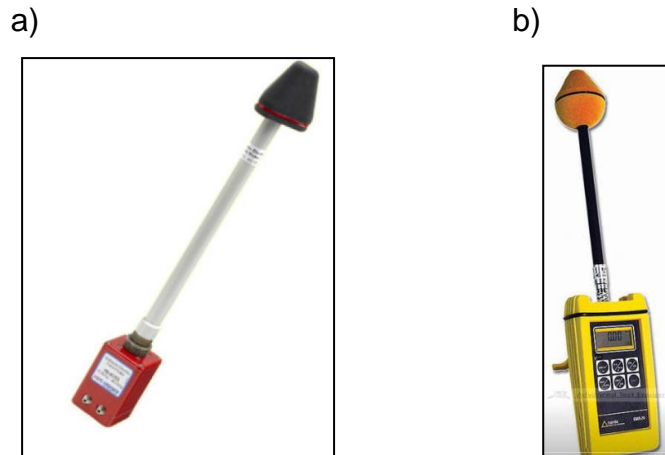
Fonte: figura obtida de [50].

Nas medições de campo da célula TEM construída foram utilizados 2 sensores de campo elétrico, sendo um do tipo Narda EMR para os testes de intensidade de

campo no interior da célula vazia e, por possuir uma dimensão menor, também foi utilizado o sensor ETS - Lindgren HI 6153 para verificação da intensidade de campo no interior de blindagens.

A figura 31 a seguir apresenta os citados sensores.

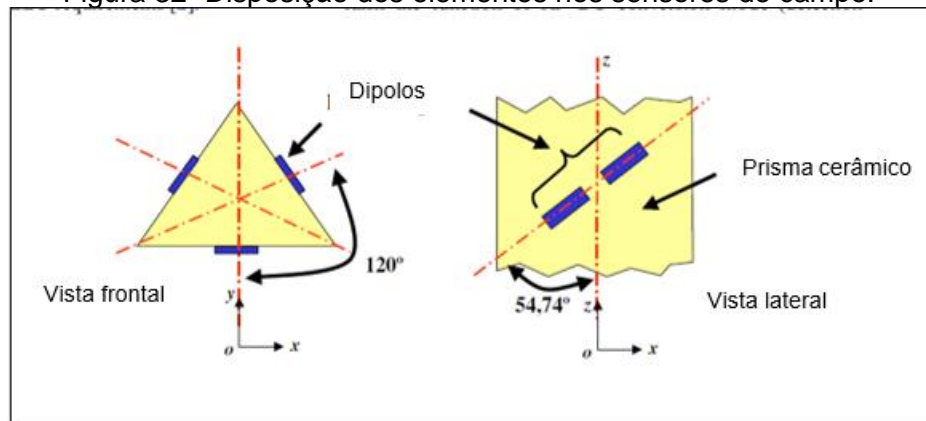
Figura 31 - Sensores de campo utilizados: a) ETS - Lindgren HI 6153; b) Narda EMR.



Fonte: Imagens obtidas de [51] e [52].

Esses sensores possuem suas antenas dipolo dispostas conforme apresentado esquematicamente na Figura 32.

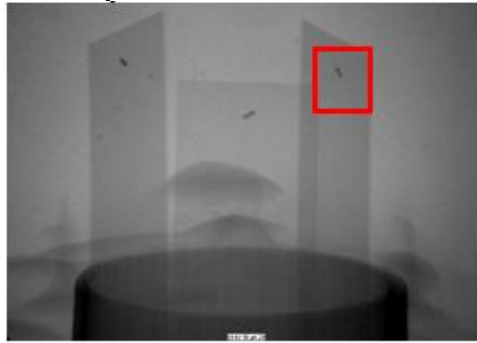
Figura 32 - Disposição dos elementos nos sensores de campo.



Fonte: figura obtida de [53].

Considerando o sensor de campo elétrico ETS - Lindgren HI 6153, foi realizada uma radiografia (figura 33) na qual é possível - no retângulo vermelho - visualizar um dos pequenos dipolos posicionados internamente, ocupando a largura (diâmetro) da haste do sensor.

Figura 33 - Radiografia do conjunto de antenas do sensor ETS-Lindgren HI 6153.



Fonte :INPE.

Na literatura técnica referente ao sensor ETS-Lindgren HI 6153, fornecida pelo fabricante, obtém-se as informações relevantes a seguir [51].

O sensor realiza leituras das componentes x, y e z de forma individual (os três elementos são mutuamente ortogonais) e apresenta o valor da resultante

$$E_{resultante} = \sqrt{CF \cdot E_x^2 + CF \cdot E_y^2 + CF \cdot E_z^2} \quad (19)$$

sendo:

CF – fator de correção, observando-se os resultados da calibração;

Ex, Ey, Ez - valores das componentes x,y e z do campo elétrico.

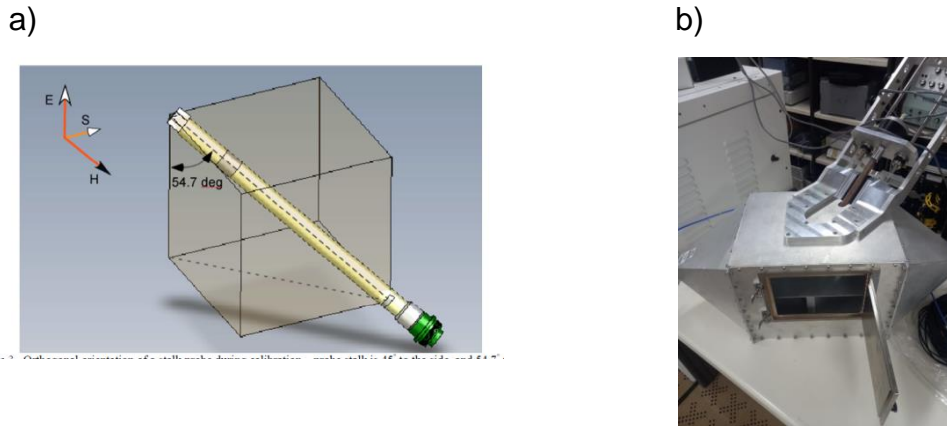
A calibração do sensor é realizada alinhando-se cada elemento individualmente com a polarização do campo elétrico incidente.

O anexo 1 apresenta os resultados de calibração do sensor ETS modelo HI 6153. Essa calibração foi realizada pelo laboratório de metrologia de altas frequências (INPE).

A figura 34 a) mostra a posição da haste do sensor para essa condição de alinhamento durante a calibração. O campo elétrico aplicado para calibração deve ser uma onda contínua sem modulação.

Para a calibração de sensores de campos elétricos é utilizada uma célula TEM com acesso pela parte superior, com inclinação adequada, como apresentado na figura 34 b).

Figura 34 - Calibração do sensor: a) Inclinação da haste para alinhamento de um elemento; b) Célula TEM para calibração.



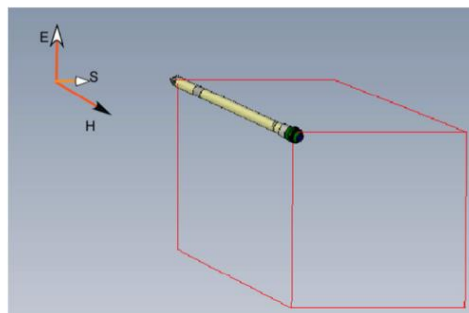
Fonte: Figura obtida de [51] e célula TEM para calibração do INPE

A calibração desses sensores de campo elétrico é realizada geralmente na célula TEM até uma frequência de 300 MHz [52], e acima desta faixa sua calibração é completada dentro da câmara anecóica. Pode-se citar que o fabricante Narda oferece calibração em laboratórios acreditados, com diferentes níveis de campo elétrico e faixas de frequência [52].

4.2 Validação da correspondência de geração de campo elétrico na câmara anecóica e na célula TEM

Para medição do campo elétrico com o sensor ETS-Lindgren HI 6153, foi ele orientado conforme sugestão de disposição do fabricante (figura 35). Essa orientação (haste na direção do campo magnético H) é recomendada para minimizar a captação de H pela linha de alta impedância dentro da haste.

Figura 35 - Posição recomendada para o sensor de campo.



Fonte: Figura obtida de [51].

Configurando-se o arranjo de teste de imunidade irradiada na câmara anecóica para geração de campo elétrico no sentido vertical nas frequências 100 e 200 MHz sem modulação e com intensidade máxima em torno de 20V/m de campo elétrico resultante, o sensor de campo ETS-Lindgren foi posicionado a 1,5m de altura, com a face marcada com X para cima. Nessa condição, a componente medida como x é aproximadamente horizontal e as outras duas, Y e Z, representam o campo vertical. A tela de medição do sensor mostra a resultante e as componentes individuais. Na figura 36 vê-se a montagem experimental utilizada.

Figura 36 - Configuração do ensaio na câmara anecóica.



Fonte: autor.

Os resultados dessa medição foram comparados com os obtidos inserindo-se o sensor de campo elétrico na mesma posição no interior da célula TEM (figura 37) e repetindo as mesmas condições de testes.

Como se pretende utilizar a célula TEM em testes de imunidade, deve-se verificar se podem ser obtidos valores adequados de campo elétrico em seu interior, assim como foram obtidos na câmara anecóica. Com esta finalidade, foi conectado o gerador na célula TEM, e foram aplicados sinais nas mesmas frequências utilizadas na câmara (100 e 200 MHz), procurando ajustar a intensidade de campo próxima de 20 V/m sem modulação, para comparação. Como mostra a figura 37, o sensor de campo foi posicionado no centro da célula, com a face X voltada para cima, representando uma situação similar à do teste em câmara anecóica.

Figura 37 - Medição na célula TEM



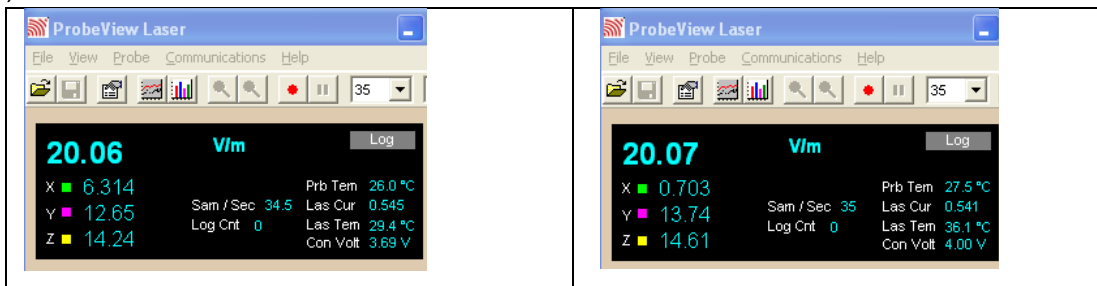
Fonte: autor

A figura 38 mostra os valores de campo elétrico obtidos na câmara e na célula nas duas frequências utilizadas. Em cada “tela” do sensor aparece o valor do campo resultante, além dos valores das componentes x, y e z. Com o posicionamento do sensor adotado nas medições e dada a sua construção interna, observa-se, nas telas, a predominância das componentes y e z, mostrando que os campos gerados têm orientação predominantemente vertical.

Figura 38 - Intensidade de campo medida em duas frequências a) 100 MHz; b) 200 MHz.

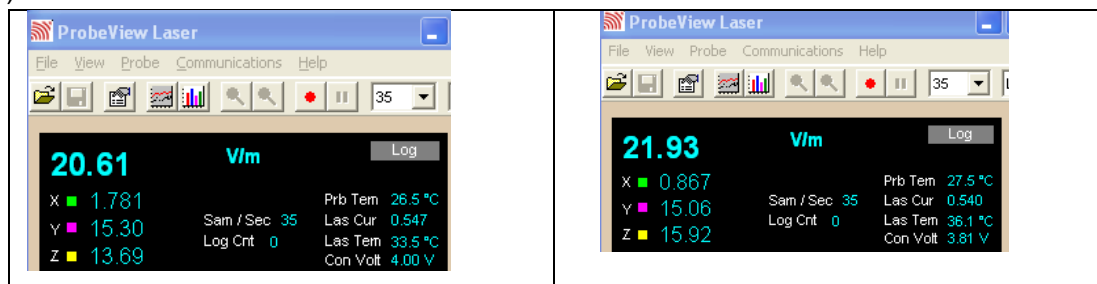
a) Na câmara anecóica

Na célula TEM



b) Na câmara anecóica

Na célula TEM



Fonte: autor

Pelos resultados obtidos vê-se que é possível criar dentro da célula valores de campo elétrico compatíveis com os obtidos na câmara. Assim, pode-se prever o comportamento de dispositivos, em relação à imunidade, de forma simples e com baixo custo.

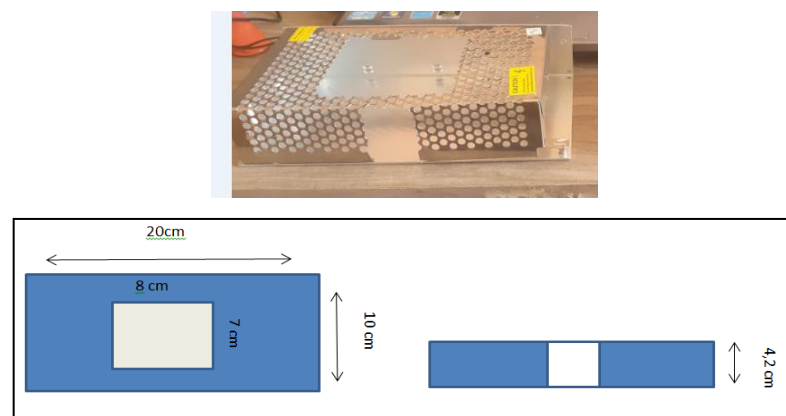
4.3 Aplicação ao estudo de blindagem de equipamentos

Para a comprovação da possibilidade de emprego de célula TEM na análise prévia de imunidade, foi escolhido um dispositivo (fonte de alimentação) com blindagem (caixa metálica), de dimensões 20 cm de comprimento, 10 cm de largura e 4,2 cm de altura. A célula TEM foi utilizada para avaliar o efeito de aberturas, realizadas na caixa, sobre a eficácia da blindagem, de modo que se se tratasse de um dispositivo em desenvolvimento, poderiam ser introduzidas modificações visando satisfazer as condições de imunidade eletromagnética.

Vale ressaltar que, pela Norma IEC 61000-4-20, o comprimento e a largura do dispositivo escolhido são compatíveis com as condições de uso da célula. Entretanto, a altura excede o limite imposto pela Norma (3 cm). Inicialmente foi utilizada uma antena do tipo monopolo para medição do campo no interior da blindagem, porém havia um acoplamento indesejado do sinal pelos cabos coaxiais da sua comunicação. Assim, foi adotado o sensor de campo elétrico com comunicação por fibra óptica disponível no IPT, o sensor da ETS-Lindgren, com forma aproximadamente piramidal, de dimensão máxima (altura) de 4,5 cm, e a caixa foi escolhida para permitir a acomodação do sensor em seu interior sem a presença da placa de circuito do dispositivo. Ainda, aproveitaram-se as aberturas praticadas na caixa (parte superior) para criar condições de introdução do sensor. Os ensaios foram realizados em duas caixas, cada uma com uma abertura diferente, verificando a eficácia da blindagem em cada caso, por meio da célula TEM, por simulação computacional e por medições em câmara anecóica.

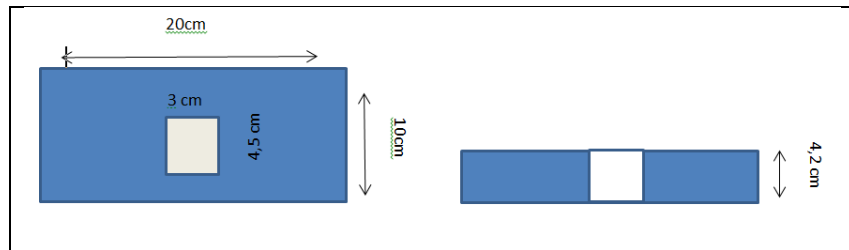
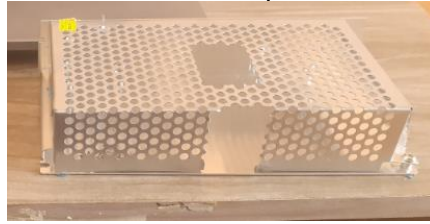
As figuras 39 e 40 mostram as duas caixas de blindagem e as aberturas nelas executadas.

Figura 39 - Caixa 1 e respectivas aberturas



Fonte: autor

Figura 40 - Caixa 2 e respectivas aberturas



Fonte : Autor.

A figura 41 mostra o sensor posicionado para medir o campo na caixa 1 (abertura maior).

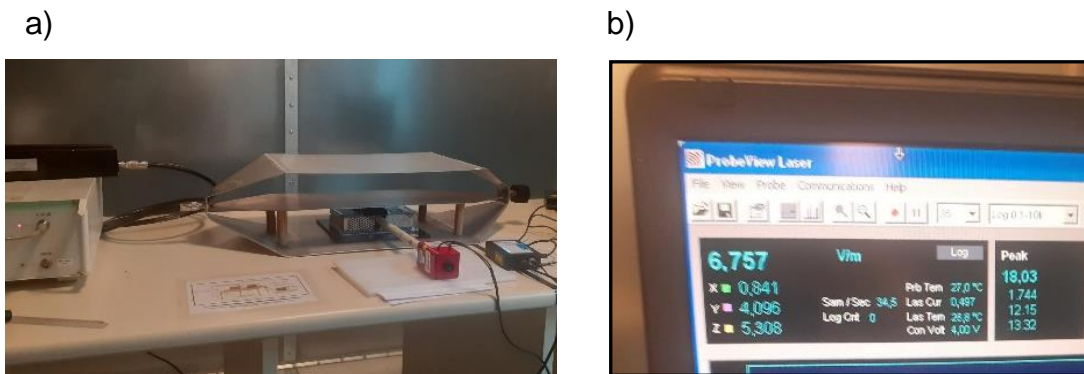
Figura 41 - Acomodação do sensor com a configuração da caixa 1.



Fonte: Autor.

Na célula vazia, foi ajustado o valor do campo elétrico em 9,8 V/m na frequência de 100 MHz. A seguir, o conjunto blindagem/sensor foi colocado dentro da célula TEM e foi observado campo elétrico resultante de aproximadamente 6,8 V/m no interior da blindagem, como mostra a figura 42. Uma observação de caráter geral deve ser feita a respeito dos valores de campo elétrico ajustados em diferentes locais: o gerador disponível tem controle de amplitude por incrementos (não contínuo), de forma que os valores desejados (10 V/m, neste caso) são obtidos dentro de uma certa tolerância.

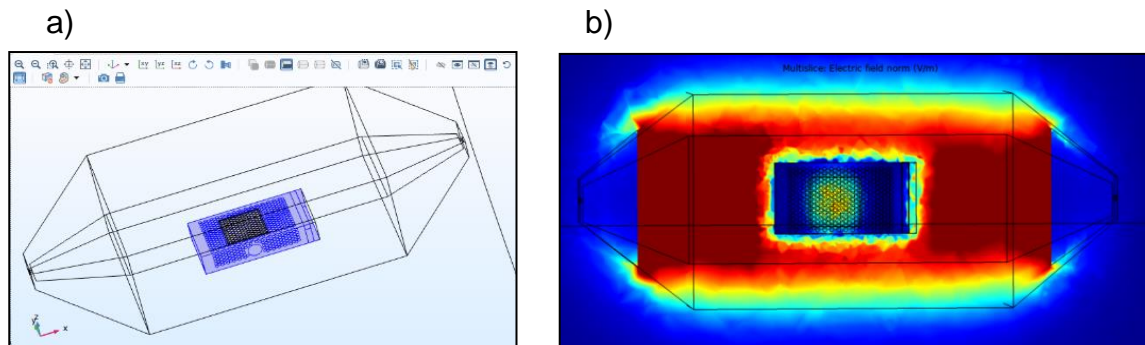
Figura 42 - Campo elétrico no interior da blindagem, frequência 100 MHz.
a) medição do campo; b) leitura do valor de campo.



Fonte: autor

Utilizando o COMSOL, foi realizada a simulação da caixa com abertura colocada dentro da célula (figura 43) e foi obtido campo elétrico a meia altura da caixa de aproximadamente 6,4 V/m, o que representa uma boa concordância, levando em conta a imprecisão na modelagem da estrutura e o desconhecimento da exata posição dos elementos do sensor.

Figura 43 - Simulação da caixa de blindagem 1 na célula a) desenho da caixa; b) vista superior do campo elétrico em mapa de cores .



Fonte: Autor.

Posteriormente, a mesma caixa foi submetida ao campo gerado dentro da câmara anecóica, como mostrado na figura 44, mantendo a mesma condição de polarização da onda (vertical) e com intensidade de 10,2 V/m sem a presença da caixa. Inserindo a caixa na câmara, obteve-se campo elétrico igual a 4,5 V/m.

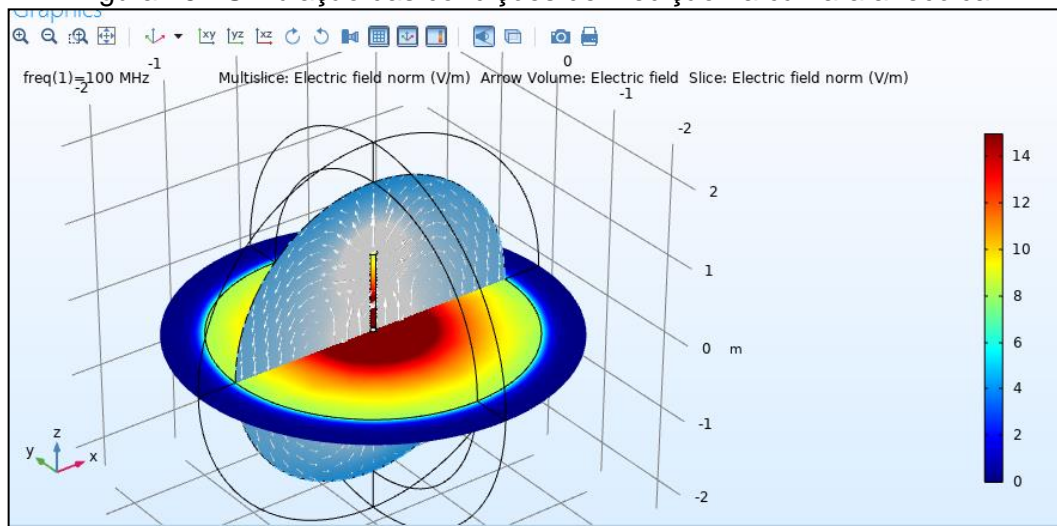
Figura 44 - Setup de medição dentro da câmara anecóica com blindagem



Fonte: autor.

Utilizando o software COMSOL, foi também realizada a simulação referente à medição realizada na câmara anecóica. Um antena dipolo foi representada no sistema, na frequência de 100 MHz, envolta por uma camada PML esférica, como mostra a figura 45. Com isso, obteve-se um campo elétrico vertical de cerca de 10 V/m na região (amarela) em que foi introduzida a caixa. Realizada a simulação, resultou um campo elétrico de 4,6 V/m no interior da caixa.

Figura 45 - Simulação das condições de medição na câmara anecóica.



Fonte: Autor.

Na sequência, foram realizados os mesmos procedimentos, agora utilizando a caixa com abertura menor (caixa 2), ainda na frequência de 100 MHz. A Tabela 4 abaixo resume os resultados obtidos com as duas caixas.

Tabela 4 - Resultados de simulação e medição com as duas caixas em 100 MHz.

Frequência 100 MHz			
Campo elétrico sem a caixa			
Em simulação no interior da célula TEM e na câmara		10,6 V/m	
Medido no interior da célula TEM		9,8 V/m	
Medido no interior da câmara anecóica		10,2 V/m	
caixa 1 – abertura maior, intensidade de campo medido no interior da blindagem			
Simulação		Medição	
Câmara anecóica	4,6 V/m	Câmara anecóica	4,5 V/m
Célula TEM	6,4 V/m	Célula TEM	6,8 V/m
caixa 2 – abertura menor, intensidade de campo medido no interior da blindagem			
Simulação		Medição	
Câmara anecóica	1,4 V/m	Câmara anecóica	1,3 V/m
Célula TEM	2,1 V/m	Célula TEM	2,5 V/m

Fonte: Autor.

Verifica-se na Tabela 4 a consistência dos resultados obtidos por medição e por simulação, tanto na câmara como na célula TEM.

Também, apesar de terem sido obtidos valores diferentes na Câmara e na célula, observa-se a prevista redução do campo elétrico no interior da blindagem ao reduzir o tamanho da abertura. Considerando os valores obtidos na simulação, a redução do campo é 10,4 dB para a câmara e 9,5 dB para a Célula TEM. Nas medições, esses valores passam a 10,9 dB e 8,7 dB, respectivamente.

A imunidade irradiada de um equipamento refere-se ao seu correto funcionamento quando exposto a um sinal de interferência e o respectivo ensaio assim é realizado. Numa avaliação prévia dessa imunidade durante a fase de desenvolvimento do equipamento, é interessante obter uma diretriz quanto à melhoria da blindagem, que resulte numa menor interferência. Os resultados constantes da tabela 4 permitam dizer que a Célula TEM pode ser utilizada para auxiliar na fase de desenvolvimento de um produto.

Os valores diferentes obtidos neste estudo na Célula e na Câmara estão ligados às limitações impostas pelo sensor disponível, não inteiramente adequado às dimensões da célula.

O volume útil de ensaios da célula construída tem altura de cerca de 3 cm, enquanto que o sensor disponível (aproximadamente piramidal) apresenta uma dimensão de 4,5 cm. Isto também determinou a utilização de uma blindagem (caixa) de maior altura, como já explicado no item 4.3. A presença do volume metálico apreciável da caixa interfere na distribuição de campo no interior da célula.

Para esclarecer o efeito dessa limitação, foram realizadas simulações com o COMSOL, considerando diferentes alturas da caixa de blindagem, a de altura original (4,2 cm), e mais duas possíveis situações de altura com dimensões de 3 cm e 2 cm, considerando as duas aberturas utilizadas (caixa 1 e caixa 2). Foram calculados os valores de campo elétrico na posição em que o sensor foi colocado anteriormente, introduzindo a caixa na câmara e na célula. As tabelas 5 e 6 mostram os resultados obtidos.

Tabela 5 – Influência da altura da caixa 1 (abertura maior) sobre o campo elétrico em seu interior : simulação computacional.

Altura 4,2 cm		Altura 3 cm		Altura 2 cm	
Local	campo elétrico	Local	campo elétrico	Local	campo elétrico
câmara anec.	4,6 V/m	câmara anec.	5,0 V/m	câmara anec.	6,3 V/m
Célula TEM	6,4 V/m	Célula TEM	6,0 V/m	Célula TEM	7,0 V/m
Diferença	39 %	Diferença	20 %	Diferença	11 %

Fonte: Autor.

Tabela 6 - Influência da altura da caixa 2 (abertura menor) sobre o campo elétrico em seu interior: simulação computacional.

Altura 4,2 cm		Altura 3 cm		Altura 2 cm	
Local	campo elétrico	Local	campo elétrico	Local	campo elétrico
Câmara anec.	1,4 V/m	Câmara anec.	2,1 V/m	Câmara anec.	3,4 V/m
Célula TEM	2,1 V/m	Célula TEM	2,3 V/m	Célula TEM	3,5 V/m
Diferença	50 %	Diferença	9 %	Diferença	3 %

Fonte: Autor.

Observa-se que a diferença (calculada em porcentagem do valor na câmara) dos valores obtidos na célula e na câmara diminui com a altura da caixa, com ambas aberturas.

Em particular, se considerarmos uma caixa com a altura máxima recomendável (3 cm), a redução da abertura causa um redução do campo de $5,0/2,1 = 2,4$ por cálculo na câmara e de $6,0/2,3 = 2,6$ na célula, o que representa uma boa concordância de valores. No caso de caixa com 2 cm de altura, os valores da redução são, respectivamente, $6,3/3,4 = 1,9$ e $7,0/3,5 = 2,0$, mais próximos ainda.

Esses resultados mostram a importância de serem respeitadas as limitações para a correta utilização da célula, considerando a medição de campos. Isto não foi possível com o sensor de campo disponível, mas uma informação qualitativa sobre o efeito de blindagem foi obtida, o que na prática contribuiria para o desenvolvimento de um projeto de equipamento, no aspecto imunidade irradiada.

5 Conclusões

No presente trabalho de Mestrado procurou-se investigar a viabilidade do uso de uma célula TEM como ambiente para a análise prévia da imunidade irradiada de um dispositivo eletrônico de pequenas dimensões. O ponto crucial da possibilidade de uso da célula TEM é o fato de nela poder ser gerado campo com intensidades semelhantes às existentes no ambiente de uma câmara anecóica.

O estudo iniciou-se com a construção de uma célula de duas portas, de dimensões compatíveis com o local dos ensaios, optando-se por uma configuração aberta, mais simples.

Essa célula foi, então, caracterizada sob o aspecto elétrico, utilizando-se tanto medições realizadas em laboratório como simulações computacionais com o software comercial COMSOL, em frequências de até 200 MHz. Foi determinada a impedância característica da célula por meio de um analisador de rede e também com um equipamento de TDR, que permitiu observar o comportamento da impedância ao longo da célula, não trivial devido à complexidade geométrica da estrutura. Essa análise mais detalhada permitiu otimizar a transição entre o septo e os conectores nas portas do lado do gerador e da carga. Essa melhoria foi confirmada pela medição do VSWR, que resultou em um valor limitado a 1,3 para a faixa de frequências de até 200 MHz, valor que está de acordo com a Norma IEC 61000-4-20, aplicável ao uso da célula.

A Norma também estabelece as condições de uniformidade de campo elétrico para utilização da célula. As medições mostraram um comportamento adequado do campo ao longo da célula, bem como em sua seção transversal. Esse comportamento foi verificado por meio de simulação realizada com o software COMSOL. Vale ressaltar que, na célula construída, com uma moderada tensão de gerador de 10 V pode-se obter campo elétrico superior a 100V/m.

Estabelecidas as características da célula TEM, foi ela utilizada para avaliar o comportamento de um dispositivo na presença de um campo elétrico de interferência, como ocorre num ensaio de imunidade irradiada. Como a grandeza de interesse é o campo elétrico, um estudo foi feito sobre os sensores de campo, considerando os dois tipos disponíveis.

Uma vez adotado o sensor de menor dimensão, foi escolhido um dispositivo de blindagem a ser testado na célula TEM quanto à imunidade irradiada, por meio da exposição do dispositivo a um campo elétrico. O dispositivo consiste numa caixa metálica, suposta como blindagem de um equipamento, com 20 cm de comprimento, 10 cm de largura e 4,2 cm de altura. As duas primeiras dimensões atendem as exigências da Norma aplicável IEC, mas a altura excede o limite permitido (cerca de 3 cm) para esta topologia de célula. A altura adotada do dispositivo está ligada às dimensões do menor sensor de campo elétrico disponível.

Foram praticadas aberturas de duas dimensões, originando duas situações de blindagem, analisadas por meio da determinação do campo elétrico dentro da caixa, realizada na célula, na câmara anecóica e por simulação com COMSOL. Nas medições realizadas tanto na célula como na câmara, observou-se uma redução do efeito de blindagem ao aumentar a abertura praticada na caixa. O uso da célula permite, portanto, avaliar de forma simples a imunidade do dispositivo, com baixo custo, permitindo que se façam as devidas alterações no dispositivo, ainda durante o desenvolvimento do projeto. Os valores medidos em cada situação foram diferentes na célula e na câmara, uma vez que a altura do sistema excede a limitação da Norma aplicável. Este fato foi confirmado por meio de simulação computacional com diferentes alturas do dispositivo, mostrando que ao diminuir a altura os valores obtidos na célula e na câmara tendem a se aproximar.

Como conclusão geral, pode-se dizer, portanto, que o trabalho desenvolvido mostrou a viabilidade do emprego de célula TEM para uma análise prévia da imunidade irradiada de um dispositivo de dimensões limitadas pela Norma IEC 61000-4-20, com valores de campo elétrico semelhantes aos existentes numa câmara anecóica, mas com menor custo.

5.1 Trabalhos futuros

A preocupação com a compatibilidade eletromagnética é crescente em diversos segmentos e este trabalho mostra que uma das características interessantes da célula TEM é de ser possível obter altas intensidades de campo em seu interior. Assim, uma das possibilidades de trabalho futuro é a análise da célula TEM em aplicações envolvendo pulsos eletromagnéticos (EMP) de altas intensidades de campo, de grande interesse na área militar ou na análise de confiabilidade de sistemas elétricos com a presença de descargas atmosféricas.

Adicionalmente, a medição de blindagens de dispositivos de pequenas dimensões se mostrou não trivial devido principalmente às dimensões dos sensores mais comuns disponíveis. Um trabalho futuro pode ser realizado pesquisando-se a melhor metodologia de medição, as características específicas do sensor de campo e sua instrumentação.

Referências

- [1] PAUL C. R. **Introduction to Electromagnetic Compatibility**, 2nd Edition, ISBN: 978-0-471-75500-5 January 2006 1016 Pages John Wiley & Sons N.J.
- [2] OTT H. W. **Electromagnetic Compatibility Engineering**, ISBN: 978-0-470-18930-6 August 2009 880 Pages John Wiley & Sons, Inc. N.J.
- [3] HEMMING, L. H. **Electromagnetic Anechoic Chambers: A Fundamental Design and Specification Guide**, Wiley-IEEE Press, 2002.
- [4] Disponível em: https://www.tek.com/landing-page/what-pre-compliance-emi-emc-testing_ **What is Pre-Compliance EMI/EMC Testing**. Acesso em: 25 fev.2021.
- [5] CRAWFORD, M. L. **Generation of standard electromagnetic fields using TEM transmission cells**, IEEE Transactions On Electromagnetic Compatibility, Vol. EMC-16, No. 4, Nov. 1974.
- [6] Disponível em: <https://br.comsol.com/comsol-multiphysics>. Acesso em: 3 mar.2021.
- [7] PATTERSON J. **Electromagnetic Compatibility EE430**. Disponível em: <https://cpb-us-e1.wpmucdn.com/sites.psu.edu/dist/6/23116/files/2015/01/Electromagnetic-Compatibility-Paper.pdf>. Acesso em: 3 mar.2021.
- [8] BOZEC D., ROBINSON M.P., MARSHMAN C.A. **Electromagnetic Compatibility (EMC)**. Disponível em: <https://www.ebme.co.uk/articles/clinicalengineering/electromagnetic-compatibility-emc> . Acesso em: 5 mar.2021.
- [9] LEUCHTER J., STEKLY V., BLASCH E. **Investigation of avionics power switch loading versus aircraft electromagnetic compatibility**, IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. Vol. 30, Issue 9, Sept. 2015
Page(s): 24 – 34. **DOI:** 10.1109/MAES.2015.140224.
- [10] KOZAN M. D., USTA E. **EMC Test Requirements for Electric Vehicles**. 2019 Fifth International Electromagnetic Compatibility Conference (EMC Turkiye). 22-25 Sept. 2019. **DOI:** 10.1109/EMCTurkiye45372.2019.8976016_
- [11] LUN T, C. **Designing for Board Level Electromagnetic Compatibility**. Freescale Semiconductor Application Note AN2321 Rev. 1, 10/2005.

- [12] SILAGHI A-M. DESABATA A. **Emissions and Immunity EMC Testing at Continental Automotive Timisoara**. Journal Of Electrical and Electronics Engineering. Vol.11, No. 1, May 2018.
- [13] LECA J. P., FROIDEVAUX N., DUPRÉ P., JACQUEMOD G., BRAQUET H. **EMI Measurements, Modeling, and Reduction of 32-Bit High-Performance Microcontrollers**, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 56, no. 5, Oct. 2014 pp. 1035-1044. DOI: [10.1109/TEMC.2014.2304744](https://doi.org/10.1109/TEMC.2014.2304744).
- [14] SILAGHI A-M., BALAN C., TOLAN E., DE SABATA A. **The Influence of measurement setups in Radiated Emissions testing**. 2017 14th International Conference on Engineering of Modern Electric Systems (EMES). 1-2 June 2017, Oradea. DOI: [10.1109/EMES.2017.7980419](https://doi.org/10.1109/EMES.2017.7980419).
- [15] ABNT NBR IEC 61000-4-3:2014, **Compatibilidade eletromagnética (EMC) Parte 4-3** : Ensaio e técnicas de medição – Ensaio de imunidade a campos eletromagnéticos de radiofrequências irradiados.
- [16] PYTHOUD F. **Proficiency Testing in EMC Radiated Immunity**, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 60, no. 5, Oct. 2018 pp 1249-1253.
- [17] ÇAKIR S., SEN O.,TEKTAS B., ÇETINTAS M. **Investigation of Different Alternative Radiated Immunity Test Methods**, IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine – Volume 6 – Quarter 1, 2017.
- [18] IEC 61000-4-20 Electromagnetic Compatibility (EMC)- Part 4-20: **Testing and measurement techniques** – Emission and Immunity testing in transverse electromagnetic (TEM) waveguides: 2022.
- [19] NICOLAE P.-M., NICOLAE I.- D., STANESCU D.-G., SMARANDESCU I.-D., DINA L.-A. **The mobile phone immunity tests performed in a GTEM 250 cell**, 3rd International Symposium on Environmental Friendly Energies and Applications (EFEA) 9-21 Nov. 2014, Paris. DOI: [10.1109/EFEA.2014.7059972](https://doi.org/10.1109/EFEA.2014.7059972).
- [20] ARDIATNA W., MANDARIS D., BAKTI A. N., HIDAYAT S. W. LEFERINK F. **EMI Risk Analysis via Dedicated Evaluation of the Susceptibility of Medical Devices**, 2018 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and 2018 IEEE Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC/APEMC), 14-18 May 2018, Singapore. DOI: [10.1109/EMC/APEMC36168.2018](https://doi.org/10.1109/EMC/APEMC36168.2018).

[21]. BRIEST N., HAMANN D., GARBE H., POTTHAST S., **Extension of the IEC 61000-4-20 Annex C to the Use of Arbitrary Transient Signals**, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 59, No.4, Aug. 2017 pp 1276 - 1284 DOI: 10.1109/TEMPC.2017.2666880.

[22] CHEN Y., WAN H., ZHOU X., **Simulation of Lightning Electromagnetic Fields and Application to Immunity Testing**, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 57, no. 4, Aug. 2015 pp 709-718.

[23] JULSTROM S. D., KOZMA-SPYTEK L. K., BEARD B. B. **Radio Frequency Immunity Testing of Hearing Aids**, IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine – volume 2, Quarter 2, 2013 pp 69-81.

[24] CHALUVADI M., VINCENTRAJ G., GEORGE THOMAS K. **A Comparison Study on Conducted Emission Test in International EMC Standards**, 2017 IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering (ICPCSI) Sep.21-22, 2017, Chennai. DOI: 10.1109/ICPCSI42447.2017.

[25] NICOLAE P.-M., STOICA C.-M., MIHAI G. **Conducted Emission Measurements for a Laptop**, 2014 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE) Oct. 23-25, 2014, Craiova. DOI: 10.1109/ICATE32678.2014.

[26] A Practical Guide for EN 61000-4-6: **Testing and measurement techniques** Disponível em: https://www.emcstandards.co.uk/files/61000-4-6_immunity_to_conducted_rfi_2_1.pdf . Acesso em: 10 mar.2021.

[27] TAS E., PYTHOUD F. **Design, Implementation, and Evaluation of Proficiency Testing in EMC Conducted Immunity**. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 59, no. 5, oct. 2017 pp 1433-1440.

[28] FUHRER M. **Test procedures for conducted transient immunity testing for low frequency energy meters**, 2013 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility(APEMC), May 20-23, 2013, Melbourne. DOI:10.1109/APEMC20958.2013.

[29] Disponível em: <https://antennatestlab.com/antenna-education-tutorials/what-is-an-anechoic-chamber>. Acesso em: 10 mar.2021.

[30] Disponível em: <https://www.euro-emc.co.uk/product/modular-shielded-room>
<https://www.euro-emc.co.uk/product/modular-shielded>

rooms?gclid=Cj0KCQiAs5eCBhCBARIsAEhk4r5aw1xDz2zWki_wOvd6F49FNCEa1tUtpKzfNZGh-SDUuLInW1LNvgMaAgFwEALw_wcB. Acesso em: 10 mar.2021.

[31] PRZESMYCKI R., BUGAJ M. **Shielding effectiveness measurement of the anechoic chamber**, 2020 43rd International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), July 7-9, 2020, Milan. DOI: 10.1109/TSP49548.2020.

[32] SHIDA H., WADA O., ASAJI Y., OTANI K., NINOMIYA H., OKUDA Y., INOUE M. **Influence of test table materials on radiated immunity test: Report on investigation using a giant anechoic chamber**, 2018 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and 2018 IEEE Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC/APEMC), May 14-18, 2018, Singapore. DOI: 10.1109/ISEMC.2018.8393844.

[33] Disponível em :<https://emcfastpass.com/tem-cell-guide/>. **TEM Cell and GTEM Guide For Radiated Emissions & Radiated Immunity Pre-Compliance Testing**, Acesso em: 13 mar.2021.

[34] SALHI M. A., ÇAKIR S., ÇINAR M., TEKTAS B., ÇETINTAS M. **GTEM Cell as an alternative method for radiated immunity tests – A comparison with anechoic chamber**, Proc. of the 2016 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE 2016, Wroclaw, Poland, September 5-9, 2016. DOI: 10.1109/EMCEurope35796.2016.

[35] IEC 62132 – 2 Integrated circuits - **Measurement of electromagnetic immunity** - Part 2: Measurement of radiated immunity - TEM cell and wideband TEM cell method.

[36] BS ISO 11452-3 :2016 - Road vehicles – **Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy** – Part 3:transverse electromagnetic (TEM) cell.

[37] TAFLOVE A., HAGNESS S.C. **Computational Electrodynamics; the Finite-Difference Time Domain Method**. Boston: Artech House, 2000.

[38] HARRINGTON R. F. **Field Computation by Moment Methods**. New York: Macmillan, 1968.

[39] SILVESTER P.P., FERRARI R. L. **Finite Elements for Electrical Engineers**. New York: Cambridge University, 1996.

[40] BREBBIA C. A., DOMINGUEZ, J., **Boundary Elements: an Introductory Course**. Boston: Computational mechanics publications /McGraw-Hill, 1992.

[41] ROSTAMZADEH C., ARCHAMBEAULT B., CONNOR S. **FDTD Analysis of Symmetric TEM Cell** 2005 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC 2005, Chicago, Aug. 8-12, 2005. DOI: 10.1109/ISEMC.2005.1513571.

[42] PRYOR R. W. **Multiphysics Modeling Using COMSOL**. Mississauga, Ontario: Jones and Bartlett Publishers, 2011.

[43] KUBIK Z., SKALA J. **Shielding Effectiveness Simulation of Small Perforated Shielding Enclosures Using FEM**, Energies 2016, 9, 129; DOI:10.3390/en9030129, <https://www.mdpi.com/journal/energies>.

[44] EDER A., HOFINGER D., RITZBERGER G. **EMC Simulation Analysis of Enclosures**. Disponível em <https://www.comsol.fi/paper/simulation-analysis-of-electromagnetic-compatibility-emc-of-enclosures-41661>. Acesso em: 15 mar.2021.

[45] CRAWFORD M. L., WORKMAN J. L. **Using a TEM Cell for EMC Measurements of Electronic Equipment**, NBS Technical note 1013, 1979. <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/TN/nbstechnicalnote1013.pdf>.

[46] SATAV S. M., AGARVAL V. **Do-it-Yourself Fabrication of an Open TEM Cell for EMC Pre-compliance**, IEEE EMC Society Newsletter, no. 218, pp 66-71,2008. Disponível em <https://www.emcs.org/acstrial/newsletters/summer08/pp2.pdf>.

[47] ANGELO J. H., DIAS M. S., PEREIRA FILHO M. L., FERREIRA JUNIOR A. F. G., JANISZEWSKI J. M. **Electromagnetic interference assessment of small electronic devices with a TEM cell**. Journal of Physics: conference series Vol.1826 - April 2021. 2021 J. Phys.: Conf. Ser.1826 012093. Disponível em <https://iopscience.iop.org/issue/1742-6596/1826/1>.

[48] BALANIS C. A. **Advanced Engineering Electromagnetics**. New York: John Wiley & Sons, 1989.

[49] ANGELO J.H., TORRES F. G., JANISZEWSKI J. M.
APLICAÇÃO DO TDR PARA ANÁLISE E MELHORIA DO DESEMPENHO DE UMA CÉLULA TEM; anais do workshop de Micro-ondas 2023, DOI:10.5281/zenodo.7859148, ISSN 2675-4460

[50] Howard I. Bassen and Glenn S. Smith. **ELECTRIC FIELD PROBES - A REVIEW**. IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, VOL. AP-31, No. 5, SEPTEMBER 1983.

[51] application note. **Practical Considerations for Radiated Immunities Measurement using ETS-Lindgren EMC Probes: ETS-LINDGREN**.

[52] Disponível em :www.narda-sts.com. **Accredited calibration of field strength meters**, NSTS 0719-E0253D, Acesso em: 16 ago.2023.

[53] Christian Person & François Le Pennec & Jérôme Luc. **DESIGN, MODELISATION AND OPTIMISATION OF HIGH EFFICIENCY, MINIATURE E-FIELD PROBES PERFORMED ON 3D CERAMIC PRISMS FOR SAR EVALUATION**. Ann. Telecommun. (2008) 63:43–53, DOI 10.1007/s12243-007-0004-3, Published online: 30 January 2008.

Anexo 1 – Certificado de calibração do sensor de campo ETS.



MINISTÉRIO DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPaciaIS



PÁTRIA AMADA
BRASIL
GOVERNO FEDERAL

COMIT - Coordenação de Manufatura, Montagem, Integração e Testes
LIT - LABORATÓRIO DE INTEGRAÇÃO E TESTES

Acústica e Vibração • Alta Precisão e Telecomunicações • Dimensional • Elétrica e Magnética • Força e Torque • Massa
• Precipitação Pluviosométrica • Pressão • Radiação Solar • Temperatura e Umidade • Tempo e Frequência
Acoustic and Vibration • High Precision and Telecommunications • Dimensional • Electricity and Magnetism • Force and Torque • Mass
• Pluviometric Precipitation • Pressure • Solar Radiation • Temperature and Humidity • Time and Frequency

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO
CALIBRATION CERTIFICATE

NÚMERO: <small>NUMBER</small>	LIT33-LIT00-CC-10423	VERSÃO: <small>VERSION</small>	01	PÁGINA: <small>PAGE</small>	1 / 7
---	-----------------------------	--	-----------	---------------------------------------	--------------

OBJETO: <small>OBJECT</small>	FIELD PROBE	
FABRICANTE: <small>MANUFACTURER</small>	ETS LINDGREN	
MODELO: <small>MODEL</small>	HI-6153	
Nº DE SÉRIE: <small>SERIAL NUMBER</small>	00105910	
PATRIMÔNIO: <small>ASSET</small>	045208	
IDENTIFICAÇÃO: <small>IDENTIFICATION</small>	601 059759	

CLIENTE:
CUSTOMER

IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO S.A.
AV. PROF. ALMEIDA PRADO, 532, CIDADE UNIVERSITÁRIA - BUTANTÃ
CEP: 05508-901 - SÃO PAULO - SP
EMAIL: SONIA@IPT.BR

DATA DA CALIBRAÇÃO:
CALIBRATION DATE

11/02/2022

REGISTRO INTERNO: <small>INTERNAL REGISTER</small>	06: 0344.21.LIT33	2935.21.PRO
--	--------------------------	--------------------

ASSINATURAS AUTORIZADAS
AUTHORIZED SIGNATURES

 <p>Assinado de forma digital por Eduardo Alan de Andrade Cruz Dados: 2022.02.14 16:07:38 -03'00'</p> <p><small>Signatário Autorizado</small></p>	 <p>Digitally signed by Ricardo Suterio Date: 2022.02.14 16:38:41 -03'00'</p> <p><small>Gerente Técnico da Área de Metrologia</small></p>
--	--

Este certificado atende aos requisitos de aceitação de ISO 9001 - Coordenação Geral de Acreditação do Brasil, de acordo com a ABNT NBR 15150: (2021), a qual avalia a competência de laboratório e comprova sua confiabilidade e padão nacional de medida, e também de acordo da metrologia baseada no BIPM - International Laboratory Accreditation Cooperation. Os resultados apresentados, validam os resultados de alguns instrumentos ativos, nos parâmetros especificados, sob condições controladas e quando forem, mesmo que variáveis, de repetição sobre o período de validade de tempo estipulado.

This certificate complies with the requirements of ISO 9001 - Accreditation General Coordination of Brazil, in accordance with the ABNT NBR 15150: (2021), which is responsible for verifying the competence of the laboratory and the traceability of its standards to the national standards of measurement, and member of the international cooperation agreement of BIPM - International Laboratory Accreditation Cooperation. The results apply only to the objects described above and cannot be extended to any other object, even though similar. This document can be reproduced only in its full version.

Av. dos Astronautas, 1758 - Caixa Postal 515 - CEP: 12227-010 - São José dos Campos - SP - Tel. (12) 3208-6718 - E-mail: metrologia@inpe.br

www.inpe.br LIT33-01-001


 NÚMERO:
 NUMBER:

LIT33-LIT00-CC-10423

 VERSÃO:
 VERSION:

01

 FOLHA:
 SHEET:

2 / 7

CARACTERÍSTICAS DO OBJETO:

SPECIMEN CHARACTERISTICS

Frequência	10 MHz a 40 GHz
Amplitude	2 V/m a 800 V/m
Referência	ELECTRIC FIELD PROBES HI-8153 Electric Field Probe (https://www.atecorp.com/atecorp/media/pdf/data-sheets/ets-indgren-hi-8153-datasheet.pdf?ext=.pdf)

INSTALAÇÕES E CONDIÇÕES AMBIENTAIS:

FACILITIES AND ENVIRONMENT CONDITIONS

Local de realização da calibração:	Laboratório de Metrologia de Alta Frequência do INPE/LIT Av. dos Astronautas, 1758 – Jardim da Granja CEP: 12227-010 - São José dos Campos – SP Tel.: (12) 3208-6329 - e-mail: metrologia@lit.inpe.br
Temperatura Ambiente:	(23 ± 1) °C
Umidade Relativa:	(50 ± 10) %ur

PROCEDIMENTO:

PROCEDURE

LIT29-LIT06-PC-019 – MEDIÇÃO DE CAMPO ELÉTRICO – Calibração pelo método de campo calculado utilizando o gerador padrão do laboratório. Calibração pelo método de substituição utilizando medidor padrão do laboratório, foram realizadas 4 (quatro) medidas de cada ponto apresentado, sendo informado o valor médio.

A incerteza de medição expandida relatada é declarada como a incerteza padrão combinada multiplicada pelo fator de abrangência k , o qual para uma distribuição 1 com ν_{eff} graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação de avaliação de dados de medição: Expressão da Incerteza de Medição na Calibração – EA-4/02.

A incerteza de medição expandida para os testes de Resposta em frequência, Linearidade e Isotropia equivale a 1,8 dB, para o fator de abrangência (k) igual a 2,00 e probabilidade de abrangência de 95,45%.

O fator de correção e o erro são definidos através das seguintes equações:

$$\text{Fator de Correção} = \frac{V_{\text{referência}}}{V_{\text{medida}}}$$

$$\text{Erro} = -20 \log (\text{Fator de Correção}) [\text{dB}]$$



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

NÚMERO:
NUMBER:

LIT33-LIT00-CC-10423

VERSÃO:
VERSION:

01

FOLHA:
PAGE:

3 / 7

PADRÕES E EQUIPAMENTOS:
EQUIPMENT AND STANDARDS:

Equipamento	Marca	Modelo	Nº Série	Certificado Nº	Validade	Rastreabilidade
Gerador de Sinais	Rohde & Schwarz	SMB 100A	110148	LIT06-LIT06-CC-10322	fev22	NPE / LIT RBC (CAL 0022)
Sensor de Potência	R&S	NRP-Z91	103036	LIT33-LIT33-CC-10033	abr22	INPE / LIT RBC (CAL 0022)
Medidor de Potência	R&S	NRP2	104425	LIT06-LIT06-CC-10118	fev22	INPE / LIT RBC (CAL 0022)
Sensor de Campo Elétrico	ETS-Lindgren	H6-153	130239	142521	nov24	ETS-Lindgren
Célula TEM	ETS-Lindgren	MICRO	00143851	-	-	-
Célula TEM	ETS-Lindgren	MINI	00143851	-	-	-
Sistema de Calibração de Campo Elétrico	ETS-Lindgren	-	-	-	-	-



MINISTÉRIO DE CIENTIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

NÚMERO:
NÚMERO

LIT33-LIT00-CC-10423

VERSÃO:
VERSÃO

01

FOLHA:
FOLHA

4 / 7

RESULTADOS:
RESULTS

RESPOSTA EM FREQUÊNCIA

Frequência (MHz)	Valor de Referência (V/m)			Valor Medido (V/m)			Fator de Correção				Erro (dB)		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	MÉDIA	X	Y	Z
10,00	19,96	19,98	19,99	14,74	12,81	16,77	1,35	1,56	1,19	1,37	-2,63	-3,86	-1,53
20,00	20,03	20,03	20,03	16,62	15,26	19,03	1,20	1,31	1,05	1,19	-1,62	-2,36	-0,45
27,12	19,95	19,95	19,95	18,05	16,64	19,19	1,10	1,20	1,04	1,11	-0,87	-1,58	-0,34
30,00	19,94	19,94	19,94	18,51	17,08	19,28	1,08	1,17	1,03	1,09	-0,65	-1,34	-0,29
40,00	19,93	19,92	19,93	19,38	17,95	19,44	1,03	1,11	1,03	1,05	-0,24	-0,90	-0,21
50,00	19,92	19,92	19,92	19,87	18,51	19,72	1,00	1,08	1,01	1,03	-0,02	-0,64	-0,09
60,00	19,89	19,90	19,90	20,05	18,82	19,90	0,99	1,06	1,00	1,02	0,07	-0,48	0,00
70,00	19,92	19,92	19,92	19,99	18,87	19,91	1,00	1,06	1,00	1,02	0,03	-0,47	-0,01
80,00	19,93	19,93	19,93	19,96	18,92	19,93	1,00	1,05	1,00	1,02	0,01	-0,45	0,00
90,00	19,91	19,91	19,91	19,81	18,86	19,81	1,00	1,06	1,01	1,02	-0,04	-0,47	-0,04
100,00	19,92	19,92	19,92	19,63	18,73	19,64	1,01	1,06	1,01	1,03	-0,13	-0,53	-0,12
200,00	19,94	19,95	19,95	19,21	18,47	19,02	1,04	1,08	1,05	1,06	-0,33	-0,67	-0,42
300,00	19,95	19,95	19,92	19,09	18,38	18,88	1,05	1,09	1,06	1,06	-0,38	-0,71	-0,47
400,00	19,93	19,94	19,94	19,01	18,33	18,82	1,05	1,09	1,06	1,07	-0,41	-0,73	-0,50
500,00	19,95	19,96	19,97	19,69	19,08	19,54	1,01	1,05	1,02	1,03	-0,11	-0,39	-0,19
600,00	19,93	19,94	19,95	19,48	18,86	19,31	1,02	1,06	1,03	1,04	-0,20	-0,48	-0,28
700,00	19,92	19,93	19,93	18,22	17,64	18,06	1,09	1,13	1,10	1,11	-0,77	-1,06	-0,86
800,00	19,97	20,01	20,00	19,86	19,31	19,74	1,01	1,04	1,01	1,02	-0,05	-0,31	-0,11
900,00	19,96	19,99	19,99	19,14	18,51	18,95	1,04	1,08	1,05	1,06	-0,36	-0,67	-0,46
1000,00	19,92	19,89	19,87	19,10	18,57	19,01	1,04	1,07	1,05	1,05	-0,37	-0,60	-0,39



MINISTÉRIO DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

NÚMERO:
NUMBER:

LIT33-LIT00-CC-10423

VERSÃO:
VERSION: 01

FOLHA:
PAGE: 5 / 7

LINEARIDADE

Frequência (MHz)	Valor de Referência (V/m)			Valor Medido (V/m)			Fator de Correção				Erro (dB)		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	MÉDIA	X	Y	Z
1000,00	2,00	2,00	2,00	1,76	1,86	1,96	1,13	1,07	1,02	1,08	-1,09	-0,62	-0,16
1000,00	3,98	3,98	3,98	3,76	3,85	3,98	1,06	1,03	1,00	1,03	-0,48	-0,28	0,01
1000,00	8,01	8,01	8,01	7,37	7,35	7,40	1,09	1,09	1,08	1,09	-0,72	-0,75	-0,69
1000,00	19,97	19,97	19,96	18,79	18,55	18,67	1,06	1,08	1,07	1,07	-0,53	-0,64	-0,58
1000,00	29,73	29,72	29,72	28,21	27,87	28,04	1,05	1,07	1,06	1,06	-0,46	-0,56	-0,51
1000,00	49,50	49,50	49,50	47,59	46,78	47,05	1,04	1,06	1,05	1,05	-0,34	-0,49	-0,44
1000,00	99,36	99,36	99,35	93,24	91,60	92,20	1,07	1,08	1,08	1,08	-0,55	-0,71	-0,65
1000,00	124,56	124,54	124,53	116,88	114,37	115,52	1,07	1,09	1,08	1,08	-0,55	-0,74	-0,65
1000,00	199,19	199,14	199,12	187,51	183,71	185,10	1,06	1,08	1,08	1,07	-0,52	-0,70	-0,63
1000,00	249,07	248,94	248,98	235,97	230,80	232,33	1,06	1,08	1,07	1,07	-0,47	-0,66	-0,60
1000,00	299,87	300,92	300,83	285,90	278,60	281,67	1,05	1,08	1,07	1,07	-0,41	-0,67	-0,57
1000,00	349,45	348,99	349,26	333,57	325,21	328,48	1,05	1,07	1,06	1,06	-0,40	-0,61	-0,53
1000,00	399,30	399,28	399,14	383,56	373,44	377,57	1,04	1,07	1,06	1,06	-0,35	-0,58	-0,48
1000,00	449,12	449,03	448,97	433,76	422,39	426,43	1,04	1,06	1,05	1,05	-0,30	-0,53	-0,45
1000,00	499,14	498,96	499,16	484,22	471,53	476,60	1,03	1,06	1,05	1,05	-0,26	-0,49	-0,40
1000,00	549,06	549,74	549,44	536,42	522,61	530,00	1,02	1,05	1,04	1,04	-0,21	-0,44	-0,31
1000,00	599,35	598,93	598,88	586,60	572,72	581,56	1,02	1,05	1,03	1,03	-0,16	-0,39	-0,25
1000,00	647,47	647,49	647,01	636,97	622,37	632,84	1,01	1,04	1,02	1,02	-0,10	-0,34	-0,19
1000,00	696,65	696,39	696,29	693,28	674,61	685,71	1,01	1,04	1,02	1,02	-0,07	-0,30	-0,16
1000,00	747,61	747,09	746,69	743,83	724,44	734,59	1,01	1,03	1,02	1,02	-0,04	-0,27	-0,14
1000,00	796,08	795,48	795,18	794,31	773,32	783,40	1,00	1,03	1,02	1,02	-0,02	-0,25	-0,13

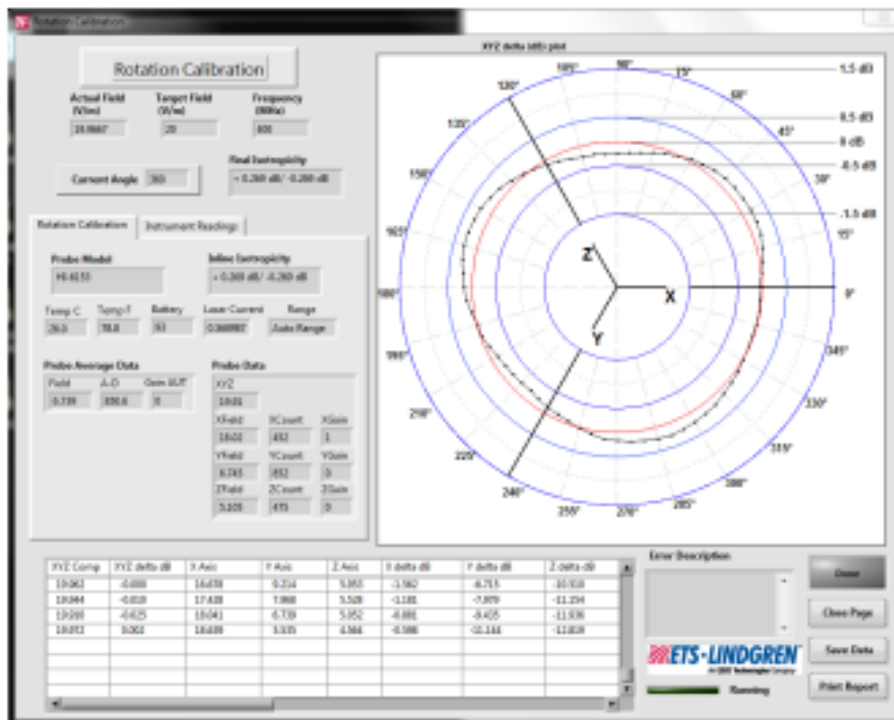

 NÚMERO:
 ALUNO:

LIT33-LIT00-CC-10423

 VERSÃO:
 VERSICIONAL 01

 FOLHA:
 6 / 7

ISOTROPIA @ 400 MHz, 20 V/m

Isotropia final: $\pm 0,269$ dB



MINISTÉRIO DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

NÚMERO:
NUMBER:

LIT33-LIT00-CC-10423

VERSÃO:
VERSION:

01

FOLHA:
PAGE:

7 / 7

MEDIÇÃO DE CAMPO ELÉTRICO - ISOTRÓPICO:

Frequência	Valor de Referência (V/m)	Valor Medido (V/m)	Incerteza de Medição Expandida (dB)	k	V _{ref}
2 GHz	4,7	4,6	2,7	2,00	Infinito
3 GHz	5,7	4,5	2,7	2,00	Infinito
4 GHz	5,1	4,2	2,7	2,00	Infinito
5 GHz	4,8	4,3	2,7	2,00	Infinito
6 GHz	4,8	4,9	2,7	2,00	Infinito

REALIZAÇÃO:
REALIZATION:

Eduardo Alan de Andrade Cruz

Carlos Junior da Silva

CONTROLE DE VERSÃO:
VERSION CONTROL:

Versão	Descrição	Data de Emissão
01	Primeira versão deste documento.	14/02/2022

